

Оценивание погрешности определения коэффициента расширения для стандартных сужающих устройств в рабочих условиях узла учёта газа

В. И. Чесноков, Б. А. Иполитов

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы, Москва, Россия,
e-mail: chesnokov@vniims.ru, ipolitov@vniims.ru

Рассмотрен вариант метода переменного перепада давления, при котором в качестве стандартных сужающих устройств используют различные сопла и трубы Вентури. На основе выражения для коэффициента расширения, применяемого в данном варианте метода переменного перепада давления как поправка на сжимаемость среды, оценены характеристики погрешности определения коэффициента расширения в рабочих условиях узла учёта газа. Проведён сравнительный анализ регламентированных стандартами и реальных показателей точности определения коэффициента расширения для различных сужающих устройств.

Ключевые слова: метод переменного перепада давления, коэффициент расширения, узел учёта, рабочие условия, показатели точности.

Традиционно метод переменного перепада давления [1–4] используется для измерений объёмного расхода газов и жидкостей в магистральных трубопроводах большого диаметра (условный диаметр трубы $Dy \geq 300$ мм). Принцип метода переменного перепада давления основан на применении уравнения Бернулли для идеальной несжимаемой жидкости [5, 6]. В гидродинамике и газовой динамике принята следующая терминология: вещество, протекающее по трубе, принято называть жидкостью независимо от того в каком агрегатном состоянии оно находится, жидком или газообразном [5]. Различают сжимаемую жидкость (обычно газ) и несжимаемую, так называемую капельную жидкость или газ, когда сжимаемостью можно пренебречь. По определению идеальная жидкость – жидкость без вязкости и, следовательно, внутреннего трения. При движении идеальной несжимаемой жидкости в трубопроводе её температура T и плотность ρ не изменяются, т. е. являются постоянными величинами. Если учесть сжимаемость газа, то при числах Маха существенно меньших единицы оценку изменения плотности $\Delta\rho$ при движении в трубе можно выразить как [5]:

$$\Delta\rho/\rho = M^2/2, \quad (1)$$

где $M = v/a$ – число Маха, равное отношению скорости движения газа v к местной скорости звука a .

Основная область применения метода переменного перепада давления – это коммерческий учёт природного газа. Скорость движения газа в магистральных трубопроводах согласно рекомендациям [7] не должна превышать 25 м/с. Природный газ на 90–95 % состоит из метана. Скорость звука в метане составляет 442,4 м/с при 20 °С [8]. При $v=25$ м/с в магистральном трубопроводе $M=0,057$. Следовательно, относительное изменение плотности по

формуле (1) составляет 0,16 %, поэтому при таких скоростях движения природный газ с указанной точностью можно рассматривать как несжимаемую жидкость, что согласуется с принципом метода переменного перепада давления.

Практическая реализация метода переменного перепада давления требует искусственного уменьшения поперечного сечения потока. Для этого в трубу врезается сужающее устройство, на котором измеряется перепад давления. С помощью уравнения Бернулли для идеальной несжимаемой жидкости и уравнения неразрывности струи по измеренному перепаду давления можно рассчитать массовый и объёмный расходы жидкости. Для стационарного потока идеальной несжимаемой жидкости в заполненном трубопроводе с круглым поперечным сечением запишем систему уравнений, включающую соответствующее уравнение Бернулли и уравнение неразрывности струи [5, 6]:

$$\left. \begin{aligned} p_1 + \rho v_1^2/2 &= p_2 + \rho v_2^2/2, \\ v_1 S_1 &= v_2 S_2, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $p_1, p_2, v_1, v_2, S_1, S_2$ – абсолютные давления, скорости жидкости и площади поперечных сечений сужающего устройства; индекс 1 относится к входному поперечному сечению, индекс 2 – к поперечному сечению сужающего устройства минимального диаметра.

Предполагается, что сужающие устройства являются телами вращения с осью симметрии, направленной вдоль продольной оси трубы.

Из системы уравнений (2) получим следующее решение:

$$v_2 = E \sqrt{2\Delta p/\rho} \quad (3)$$

где $\Delta p = p_1 - p_2$ – перепад давления на сужающем устройстве, $\Delta p \geq 0$, так как $p_1 \geq p_2$; $E = (1 - \beta^4)^{-1/2}$ – коэффициент скорости входа согласно терминологии [1]; $\beta = d_2/d_1$ – параметр, характеризующий геометрию потока, d_1, d_2 – диаметры соответственно входного и наименьшего поперечных сечений сужающего устройства.

На основании решения (3) с помощью уравнения неразрывности струи найдём выражение для массового расхода

$$q_m = \rho v_2 S_2 = \frac{\pi d_2^2}{4} E \sqrt{2 \Delta p \rho}. \quad (4)$$

Выражение (4) позволяет рассчитать массовый расход несжимаемой идеальной жидкости на основе системы уравнений (2).

В стандартизованном варианте метода переменного перепада давления [1] для повышения точности определения массового расхода жидкости (газа) в формулу (4) вводят соответствующие поправки. Поскольку все реальные вещества, протекающие по трубам, вязкие и по этой причине не являются идеальными жидкостями, то в выражение (4) вносят поправку на неидеальность текущей среды. Эта поправка учитывается умножением правой части выражения (4) на коэффициент истечения C . Следующая поправка связана с сжимаемостью жидкости (газа) и учитывается также умножением правой части выражения (4) на коэффициент расширения ε .

Запишем выражение (4) с учётом вышеуказанных поправок

$$q_m = C \varepsilon \left(\pi d_2^2 / 4 \right) E \sqrt{2 \Delta p \rho}. \quad (5)$$

Выражение (5) используется в стандартах [1–4] для определения массового расхода газа методом переменного перепада давления для различных сужающих устройств. В качестве стандартных сужающих устройств применяют диафрагмы, сопла ИСА 1932, эллипсные сопла, сопла и трубы Вентури.

В настоящей статье оценена погрешность косвенного измерения коэффициента расширения газа. При течении газа в различных соплах и трубах Вентури оценивание погрешности измерения коэффициента расширения базируется на его функциональной зависимости от параметров течения, которая выводится из уравнений технической газовой динамики и термодинамики [5, 6]. Уравнения записывают на основе представлений об элементарных струйках тока, в которых скорость течения жидкости (газа) является средней по поперечному сечению струйки скоростью переноса массы при квазистатических процессах течения. Течение газа сквозь отверстие диафрагмы нельзя считать квазистатическим, так как это необратимое течение быстро расширяющейся струи со свободными границами, не укладывающееся в представления об элементарных струйках тока с плавно меняющимися поперечными сечениями. Кроме того, быстрое расширение струи сопровождается образованием пристеночных застойных зон с обратным круговым течением газа.

Поэтому при течении газа сквозь диафрагму коэффициент расширения вводится эмпирически на основании статистической обработки экспериментальных данных.

В противоположность диафрагмам для квазистатических безотрывных течений газа в различных соплах и трубах Вентури выражение для коэффициента расширения газа можно получить, если применить описание течений, принятое в классической технической газовой динамике. Соответственно, запишем уравнения Бернулли и сохранения массы (неразрывности струи) для элементарной струйки тока сжимаемой жидкости [5, 6]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{v_1^2}{2} + \frac{k}{k-1} \frac{p_1}{\rho_1} &= \frac{v_2^2}{2} + \frac{k}{k-1} \frac{p_2}{\rho_2}, \\ \rho_1 v_1 S_1 &= \rho_2 v_2 S_2, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где k – показатель адиабаты (отношение теплоёмкости C_p газа при постоянном давлении к теплоёмкости C_v при постоянном объёме).

При решении системы уравнений (6) необходимо иметь в виду, что она не замкнута, т. е. два уравнения содержат три неизвестных параметра: v_2, p_2, ρ_2 .

Для сопел и труб Вентури систему уравнений (6) замыкают, используя предположение об адиабатическом характере течения в этих сужающих устройствах. Это предположение лежит в основе положений стандартов [1–4] и проверено десятилетиями практикой их применения.

Уравнение адиабаты для идеального газа имеет вид [5]:

$$p_1 / \rho_1^k = p_2 / \rho_2^k. \quad (7)$$

Решив систему уравнений (6), (7), получим выражение массового расхода $q_{m\text{ и}}$ идеального сжимаемого газа:

$$q_{m\text{ и}} = \rho_1 S_1 \beta^2 \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{p_1}{\rho_1} \frac{\tau^{2/k} - \tau^{(k+1)/k}}{1 - \beta^4 \tau^{2/k}}}, \quad (8)$$

где $\tau = p_2 / p_1$; p_1, p_2 – статические давления газа в сечениях 1 и 2.

В выражении (8) для массового расхода идеального газа необходимо ввести поправку на неидеальность среды умножением на коэффициент истечения C и одновременно выделить коэффициент скорости входа E . В итоге получим выражение для массового расхода $q_{m\text{ р}}$ реального газа:

$$q_{m\text{ р}} = C E S_1 \beta^2 \sqrt{\frac{2k}{k-1} (1 - \beta^4) \frac{p_1}{\rho_1} \frac{\tau^{2/k} - \tau^{(k+1)/k}}{1 - \beta^4 \tau^{2/k}}}. \quad (9)$$

Сравнив формулы (9) и (5), получим выражение для коэффициента расширения газа

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{k}{k-1} \frac{(1 - \beta^4)}{(1 - \beta^4 \tau^{2/k})} \frac{\tau^{2/k} - \tau^{(k+1)/k}}{1 - \tau}}. \quad (10)$$

Выражение (10) приведено в стандартах [1, 3, 4] для расчёта коэффициента расширения газа. Оно рекомендовано к

применению при течении газа в соплах ИСА 1932, эллипсных соплах, трубах и соплах Вентури (рассматриваются сопла и трубы Вентури с литой (без обработки) входной конической частью) при выполнении соответственно следующих условий: $0,3 \leq \beta \leq 0,8$, $0,2 \leq \beta \leq 0,8$, $0,316 \leq \beta \leq 0,775$, $0,30 \leq \beta \leq 0,75$. Для всех вышеперечисленных сужающих устройств имеет место общее условие ограничения перепада давления:

$$\Delta p / p_1 \leq 0,25. \quad (11)$$

Рассмотрим выражение (10) как известную функцию, связывающую коэффициент расширения ε и физические величины k , β , τ при его косвенном измерении. Согласно общей методологии оценивания погрешностей косвенных измерений [9] необходимо найти выражения для коэффициентов влияния погрешностей измерений вышеуказанных величин, т. е. частные производные функции (10) по переменным k , β , τ . Для упрощения дифференцирования выражение (10) представим в виде

$$\varepsilon = \sqrt{x(k)y(\beta, \tau)z(k, \tau)}, \quad (12)$$

где

$$x(k) = k/(k-1); \quad (13)$$

$$y(k, \beta, \tau) = (1-\beta^4)/(1-\beta^4\tau^{2/k}); \quad (14)$$

$$z(k, \tau) = (\tau^{2/k} - \tau^{(k+1)/k})/(1-\tau). \quad (15)$$

На основании формулы (12) частные производные коэффициента расширения газа (10) по переменным k , β , τ могут быть выражены через соответствующие частные производные функций (13)–(15):

$$\frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial k} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{x} \frac{\partial x}{\partial k} + \frac{1}{y} \frac{\partial y}{\partial k} + \frac{1}{z} \frac{\partial z}{\partial k} \right); \quad (16)$$

$$\frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \beta} = \frac{1}{2} \frac{1}{y} \frac{\partial y}{\partial \beta}, \quad (17)$$

$$\frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{y} \frac{\partial y}{\partial \tau} + \frac{1}{z} \frac{\partial z}{\partial \tau} \right). \quad (18)$$

Выполним дифференцирование функций (13)–(15) и для коэффициентов влияния b_1 , b_2 , b_3 (см. (16)–(18)) получим следующие выражения:

$$b_1 = \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial k} = -\frac{1}{2} \left[\frac{1}{k(k-1)} + \frac{\ln \tau}{k^2} \left(\frac{1+\beta^4\tau^{2/k}}{1-\beta^4\tau^{2/k}} + \frac{\tau^{2/k}}{\tau^{2/k}-\tau^{(k+1)/k}} \right) \right]; \quad (19)$$

$$b_2 = \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \beta} = -\frac{2\beta^3(1-\tau^{2/k})}{(1-\beta^4)(1-\beta^4\tau^{2/k})}; \quad (20)$$

$$b_3 = \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} = \frac{1}{2} \left(\frac{2}{k} \frac{\beta^4\tau^{(2/k)-1}}{(1-\beta^4\tau^{2/k})} + \frac{2\tau^{(2/k)-1}-(k+1)\tau^{1/k}}{k\tau(\tau^{(2/k)-1}-\tau^{1/k})} + \frac{1}{1-\tau} \right). \quad (21)$$

В соответствии с основными положениями [9] среднее квадратическое отклонение (СКО) абсолютной погрешности косвенного измерения коэффициента расширения газа определяется выражением:

$$\sigma_\varepsilon = \left[\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial k} \right)^2 \sigma_k^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial \beta} \right)^2 \sigma_\beta^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} \right)^2 \sigma_\tau^2 \right]^{1/2}, \quad (22)$$

где σ_k , σ_β , σ_τ – СКО абсолютных погрешностей измерений показателя адиабаты k , величин β , τ . Формула (22) является точечной оценкой случайной величины – погрешности измерения коэффициента расширения газа.

Согласно определению, принятому в теории вероятностей [10], квадрат СКО равен дисперсии случайной величины. По определению СКО имеет размерность рассматриваемой случайной величины.

В стандартах [1, 3, 4] нормируется относительная расширенная неопределённость U'_ε определения коэффициента расширения при условии, что неопределённости измерений показателя адиабаты и величин β , τ равны нулю. Соответствующая абсолютная расширенная неопределённость $U_\varepsilon = \varepsilon U'_\varepsilon$. Согласно положениям стандартов [11, 12] $U_\varepsilon = 2u_\varepsilon$, где u_ε – абсолютная стандартная неопределённость, коэффициент охвата равен 2. Это значение коэффициента охвата основано на допущении нормального распределения плотности вероятности случайной величины (результата измерения коэффициента расширения) и соответствует уровню доверия 0,95. Следовательно, стандартная неопределённость измерения коэффициента расширения при условии отсутствия влияния на результат неопределённостей измерений показателя адиабаты и величин β , τ рассчитывается по формуле

$$u_\varepsilon = \varepsilon U'_\varepsilon / 2. \quad (23)$$

Стандартная неопределённость u_ε характеризует разброс результатов измерений коэффициента расширения и по определению, принятому в [11, 12], квадрат стандартной неопределённости также равен дисперсии случайной величины.

В оценку (22) СКО погрешности косвенного измерения коэффициента расширения необходимо ввести u_ε в качестве неисключённой систематической погрешности метода определения коэффициента расширения (по терминологии классической теории погрешности). Так как формула (22) является практическим применением теоремы сложения дисперсий суммы независимых случайных величин (составляющих погрешности) [9, 10], то учёт в этой формуле стандартной неопределённости u_ε не вызывает затруднений. В итоге имеем

$$\sigma_\varepsilon = \left[\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial k} \right)^2 \sigma_k^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial \beta} \right)^2 \sigma_\beta^2 + \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} \right)^2 \sigma_\tau^2 + u_\varepsilon^2 \right]^{1/2}. \quad (24)$$

В выражении (24) перейдём от СКО абсолютной погрешности коэффициента расширения к СКО его

относительной погрешности $\sigma_{\varepsilon r}$ для чего левую и правую части равенства (24) разделим на коэффициент расширения ε и получим

$$\sigma_{\varepsilon r} = \left[k^2 b_1^2 \sigma_{kr}^2 + \beta^2 b_2^2 \sigma_{\beta r}^2 + \tau^2 b_3^2 \sigma_{\tau r}^2 + u_{\varepsilon r}^2 \right]^{1/2}, \quad (25)$$

где $\sigma_{kr} = \sigma_k/k$; $\sigma_{\beta r} = \sigma_{\beta}/\beta$; $\sigma_{\tau r} = \sigma_{\tau}/\tau$ – относительные СКО погрешностей измерений k , β , τ ; коэффициенты влияния b_1 , b_2 , b_3 заданы выражениями (19)–(21); в соответствии с формулой (23) относительная стандартная неопределённость $u_{\varepsilon r} = U'_{\varepsilon}/2$ где U'_{ε} регламентирована в стандартах [1, 3, 4]. Величины β , τ определяются как

$$\beta = d_2/d_1; \quad \tau = p_2/p_1 = 1 - \Delta p/p_1, \quad (26)$$

где $\Delta p = p_1 - p_2 \geq 0$.

Используем выражения (26) и согласно общей методологии оценивания погрешностей результатов косвенных измерений [9] для относительных СКО погрешностей измерений величин β , τ получим

$$\sigma_{\beta r} = \sqrt{\sigma_{d_1 r}^2 + \sigma_{d_2 r}^2}; \quad (27)$$

$$\sigma_{\tau r} = \frac{1-\tau}{\tau} \sqrt{\sigma_{\Delta p r}^2 + \sigma_{p_1 r}^2}. \quad (28)$$

где $\sigma_{d_1 r}$, $\sigma_{d_2 r}$ – относительные СКО погрешностей измерений диаметров d_1 , d_2 сечений сужающего устройства; $\sigma_{\Delta p r}$, $\sigma_{p_1 r}$ – относительные СКО погрешностей измерений перепада давления на сужающем устройстве и давления газа p_1 в его входном сечении.

В стандартах [1, 3, 4] для различных сужающих устройств (соответственно сопла ИСА 1932 и эллипсные сопла, трубы и сопла Вентури) приведены следующие выражения

$$U'_{\varepsilon} = 2\Delta p/p; \quad (29)$$

$$U'_{\varepsilon} = (4 + 100\beta^8)\Delta p/p. \quad (30)$$

Формулы (19)–(21), (25)–(30) позволяют оценить относительное СКО погрешности косвенного измерения коэффициента расширения газа в наиболее общем случае с учётом влияния методической погрешности и неточностей (погрешностей) измерений показателя адиабаты, давления, перепада давления, диаметров поперечных сечений сужающего устройства, т. е. в рабочих условиях узлов учёта газа. Относительное СКО погрешности косвенного измерения коэффициента расширения газа можно сравнить с другой характеристикой точности его измерения – неопределённостью $u_{\varepsilon r}$, которая рассчитывается делением U'_{ε} (см. (29), (30)) на коэффициент охвата. Поскольку относительная стандартная неопределённость нормирована в стандартах [1, 3, 4] без учёта показателей точности измерений влияющих величин, то сравнение СКО погрешности и стандартной неопределённости определения коэффициента расширения позволит установить влия-

ние рабочих условий узла учёта газа на точность его определения и, соответственно, на точность измерения объёмного расхода методом переменного перепада давления.

Сравнительные числовые оценки вышеперечисленных показателей точности (СКО погрешности и стандартной неопределённости) определения коэффициента расширения газа выполним для различных перепадов давления на сужающих устройствах, не противоречащих условию (11), различных показателей адиабаты, абсолютных давлений и значений параметра β . При проведении числовых расчётов необходимо помнить, что параметр β главным образом определяет перепад давления на сужающем устройстве. Поскольку расширение газа в методе переменного перепада давления учитывается, как малая поправка (умножением выражения (4) для массового расхода идеальной несжимаемой жидкости на коэффициент расширения ε), то связь перепада давления газа и параметра β в первом приближении можно установить без учёта сжимаемости газа с помощью системы (2), включающей основные уравнения метода. Второе уравнение в системе (2) является уравнением постоянства объёмного расхода $Q_V = vS$ при течении несжимаемой жидкости по трубопроводу переменного сечения S (где v – средняя по сечению скорость жидкости). С учётом постоянства объёмного расхода несжимаемой жидкости из системы (2) получим

$$\frac{\beta^4}{1-\beta^4} \Delta p = \frac{\rho}{2} \frac{Q_V^2}{S_1}. \quad (31)$$

Далее связь перепада давления и параметра β установим при следующих допущениях: диаметр входных сечений сужающих устройств $d_1 = \text{const}$; рабочая среда – несжимаемая жидкость, т. е. $\rho = \text{const}$; перепады давления Δp на сужающих устройствах соответствуют одинаковым объёмным расходам газа, т. е. $Q_V = \text{const}$. При принятых допущениях на основании выражения (31) можно записать приближённое равенство (для двух однотипных сужающих устройств с различными диаметрами d_2 минимальных поперечных сечений):

$$\frac{\beta_1^4(1-\tau_1)}{1-\beta_1^4} = \frac{\beta_2^4(1-\tau_2)}{1-\beta_2^4}, \quad (32)$$

где перепад давления выражен через параметр τ .

Уравнение (32) позволяет найти параметр β_2 при заданных β_1 , τ_1 , τ_2 .

Решение имеет вид

$$\beta_2 = [A/(A+1)]^{1/4}; \quad (33)$$

$$A = \frac{\beta_1^4}{1-\beta_1^4} \frac{1-\tau_1}{1-\tau_2}. \quad (34)$$

При широком практическом применении метода переменного перепада давления для измерения объёмного расхода газа, поставляемого промышленным потребителям, характерны следующие диапазоны:

измерений давления и перепада давления соответственно $0,1 \leq p_1 \leq 7,5$ МПа; $0 \leq \Delta p \leq 1000$ кПа;

приведённые погрешности измерений давления γ_p и перепада давления $\gamma_{\Delta p}$ (в зависимости от типа и исполнения используемых датчиков) соответственно $\gamma_p = \pm 0,3; \pm 0,5; \pm 0,8$ %; $\gamma_{\Delta p} = \pm 0,2; \pm 0,3; \pm 0,4$ %.

Согласно представлениям классической кинетической теории газов [5] показатель адиабаты (коэффициент Пуассона C_p/C_v) идеальных газов (одно-, двух- и многоатомных) находится в интервале $(4/3 - 5/3) = (1,33 - 1,67)$. Из числовых примеров, приведённых в стандартах [14, 15], следует, что показатель адиабаты природного газа при умеренных давлениях (до 7,5 МПа) и при температурах $250 \leq T \leq 350$ К (в зависимости от состава) изменяется от 1,28 до 1,47. Относительная погрешность определения показателя адиабаты природного газа при давлении до 6 МПа в указанном диапазоне температур составляет 2,5 % и только при температурах $250 \leq T \leq 260$ К и давлениях 6–7,5 МПа равна 4,9 % [14].

Диаметры измерительных трубопроводов узлов учёта газа, поставляемого промышленным потребителям, $d_1 = 150 \dots 500$ мм. Примем, что абсолютное давление газа p_1 в измерительном трубопроводе соответствует давлению газа в системе газораспределительной организации после редуцирования из системы магистральных газопроводов и составляет 0,59 МПа или 1,18 МПа (приблизительно 6 атм или 12 атм).

Оценивание характеристик точности определения коэффициента расширения проведём совместно с анализом значений коэффициентов влияния величин, входящих в формулу измерений (10). Коэффициенты влияния рассчитываются по формулам (19)–(21). В соответствии с вышеприведёнными областями изменений входных величин проведём расчёты при следующих значениях.

Вариант 1. Верхний предел измерения абсолютного давления $p_{\max} = 7000$ кПа; рабочее абсолютное давление газа на входе сужающего устройства $p_1 = 1200$ кПа; верхний предел измерения перепада давления $\Delta p_{\max} = 1000$ кПа; приведённые погрешности измерений рабочего абсолютного давления и перепада давления $\gamma_p = \pm 0,5$ %; $\gamma_{\Delta p} = \pm 0,3$ %. Внутренний диаметр измерительного трубопровода $d_1 = 300$ мм; абсолютные погрешности измерений внутренних диаметров $\Delta d_1 = \Delta d_2 = \pm 0,1$ мм. Параметр $\tau = 0,950; 0,900; 0,850; 0,800; 0,750$, что соответствует перепаду давления, удовлетворяющему условию применимости метода (11).

Начальное значение параметра β_0 , соответствующее начальному значению параметра $\tau = 0,950$, принимаем равным 0,5, другие значения β вычисляются для каждого значения параметра τ по формулам (33), (34). Примем показатель адиабаты $k = 1,3$, относительная погрешность его определения $\delta_k = 2,5$ %.

Результаты расчётов по варианту 1 приведены в табл. 1.

Так как коэффициент расширения (10) и коэффициенты влияния (19)–(21) рассчитываются по одним и тем же формулам для всех рассматриваемых в данной статье сужающих устройств, то для сопел и труб Вентури можно привести только показатели точности определения коэффициента расширения, рассчитанные при тех же входных данных. Из табл. 1 следует, что показатели точности косвенного измерения коэффициента расширения газа для сопел и труб Вентури превышают значения аналогичных показателей для сопел ИСА 1932 и эллипсных сопел. Различия возникают уже на этапе нормирования относительной расширенной неопределённости определения коэффициента расширения в стандартах [3, 4]. Для сопел и труб Вентури стандартная расширенная относительная неопределённость определения коэффициента расширения приблизительно в два раза больше, чем для сопел ИСА 1932 и эллипсных сопел.

Кроме того, анализ результатов расчётов, приведённых в табл. 1 и полученных при значениях входных величин, соответствующих варианту 1, показывает, что в заявленном диапазоне перепада давления коэффициент влияния b_1 более чем в шесть раз меньше коэффициента b_3 , а коэффициент b_2 по модулю приблизительно в 27 раз меньше коэффициента b_3 . Последнее означает, что показатели точности измерения величин k, β слабо влияют на точность косвенного измерения коэффициента расширения газа. Также можно предположить, что указанное соотношение коэффициентов влияния сохранится и при других значениях входных величин.

Для проверки этих соображений выполним расчёт для других входных данных (в обозначениях варианта 1).

Вариант 2. Примем $p_{\max} = 7000$ кПа; $p_1 = 600$ кПа; $\Delta p_{\max} = 1000$ кПа; $\gamma_p = \pm 0,5$ %; $\gamma_{\Delta p} = \pm 0,3$ %; $d_1 = 500$ мм; $\Delta d_1 = \Delta d_2 = \pm 0,2$ мм; $\tau = 0,950; 0,900; 0,850; 0,800; 0,750$; $k = 1,6$; $\delta_k = \pm 5,0$ %. Начальное значение $\beta_0 = 0,5$.

Результаты расчётов при изменённых входных данных (вариант 2) приведены в табл. 2. При изменении значений величин, таких как рабочее давление, внутренний диаметр трубопровода и показатель адиабаты, соотношение коэффи-

Таблица 1

Коэффициенты влияния b_1, b_2, b_3 , коэффициент расширения ε и показатели точности $\sigma_\varepsilon, u_{\varepsilon,r}$ его определения для различных сужающих устройств (вариант 1)

τ	β	b_1	b_2	b_3	ε	Сопла ИСА 1932, эллипсные сопла		Сопла и трубы Вентури	
						$\sigma_\varepsilon, \%$	$u_{\varepsilon,r}, \%$	$\sigma_\varepsilon, \%$	$u_{\varepsilon,r}, \%$
0,950	0,500	0,024639	−0,021475	0,659051	0,968345	0,129	0,050	0,162	0,110
0,900	0,424	0,048579	−0,024203	0,669749	0,938482	0,201	0,100	0,269	0,205
0,850	0,384	0,073930	−0,026047	0,701857	0,907798	0,289	0,150	0,391	0,304
0,800	0,358	0,100865	−0,027387	0,743462	0,876224	0,387	0,200	0,522	0,403
0,750	0,339	0,129591	−0,028398	0,793083	0,843682	0,496	0,250	0,660	0,502

Таблица 2

Коэффициенты влияния b_1, b_2, b_3 , коэффициент расширения ε и показатели точности $\sigma_\varepsilon, u_{\varepsilon r}$ его определения для различных сужающих устройств (вариант 2)

τ	β	b_1	b_2	b_3	ε	Сопла ИСА 1932, эллипсные сопла		Сопла и трубы Вентури	
						$\sigma_\varepsilon, \%$	$u_{\varepsilon r}, \%$	$\sigma_\varepsilon, \%$	$u_{\varepsilon r}, \%$
0,950	0,500	0,016291	- 0,017592	0,536320	0,974182	0,201	0,050	0,223	0,110
0,900	0,424	0,032133	- 0,019976	0,545233	0,949672	0,301	0,100	0,350	0,205
0,850	0,384	0,048921	- 0,021664	0,571595	0,924325	0,429	0,150	0,504	0,304
0,800	0,358	0,066773	- 0,022960	0,605727	0,898064	0,576	0,200	0,674	0,403
0,750	0,339	0,085828	- 0,024002	0,646437	0,870802	0,742	0,250	0,860	0,502

Таблица 3

Показатели точности определения коэффициента расширения (вариант 3)

τ	β	Сопла ИСА 1932, эллипсные сопла		Сопла и трубы Вентури	
		$\sigma_\varepsilon, \%$	$u_{\varepsilon r}, \%$	$\sigma_\varepsilon, \%$	$u_{\varepsilon r}, \%$
0,950	0,700	0,362	0,050	0,434	0,244
0,900	0,608	0,472	0,100	0,546	0,293
0,850	0,556	0,644	0,150	0,726	0,368
0,800	0,520	0,852	0,200	0,944	0,454
0,750	0,494	1,094	0,250	1,196	0,544

циентов влияния b_1, b_2, b_3 остаётся приблизительно прежним, значения коэффициентов b_1, b_2, b_3 изменяются относительно слабо, не более чем на 50 %. Так как коэффициенты влияния b_1, b_2 существенно меньше коэффициента влияния b_3 , то показатели точности определения коэффициента расширения слабо зависят от погрешностей измерений внутреннего диаметра трубопровода и показателя адиабаты. Основными являются погрешности измерений давления и перепада давления. В связи с этими замечаниями можно провести приближённую оценку «сверху» показателей точности определения коэффициента расширения, которая ещё будет соответствовать типичным реальным условиям эксплуатации узлов учёта газа, работающих с использованием метода переменного перепада давления.

Вариант 3. Зададим следующие входные данные:

$p_{\max}=7000$ кПа; $p_1=1200$ кПа; $\Delta p_{\max}=1000$ кПа; $\gamma_p=\pm 0,8\%$; $\gamma_{\Delta p}=\pm 0,4\%$; $d_1=500$ мм; $\Delta d_1=\Delta d_2=\pm 0,2$ мм; $\tau=0,950; 0,900; 0,850; 0,800; 0,750$; $k=1,45$; $\delta_k=\pm 2,5\%$. Начальное значение $\beta_0=0,7$.

Результаты оценивания «сверху» показателей точности косвенного измерения коэффициента расширения при входных данных (вариант 3) приведены в табл. 3. В этом варианте значения показателей точности косвенного измерения коэффициента расширения, как и ожидалось, увеличились по сравнению со значениями, представленными в табл. 1, 2. Кроме того, показано, что при типичных условиях применения метода переменного перепада давления для измерений объёма газа при подаче промышленным потребителям относительное СКО погрешности определения коэффициента расширения существенно превышает его относительную стандартную неопределённость, нормированную в стандартах [3, 4]. Так, для сопел ИСА 1932 и эллипсных сопел это превышение составляет от семи до четырёх раз (в начале и конце диапазона изменения перепада давления); для сопел и труб Вентури аналогичное превышение составляет, приблизительно, два раза по всему диапазону изменения перепада давления. При максимальных значениях перепада давления относительные СКО погрешностей косвенных измерений коэффициента расширения для сопел ИСА 1932, эллипсных сопел, а также сопел и труб Вентури приблизительно сравниваются, что указывает на определяющую роль погрешностей измерений абсолютного давления и перепада давления в оценивании погрешности коэффициента расширения. Интервальная оценка

погрешности косвенного измерения коэффициента расширения, соответствующая доверительной вероятности 0,95, приводит к выводу, что относительные погрешности определения коэффициента расширения при выбранных условиях применения метода переменного перепада давления как для сопел ИСА 1932, эллипсных сопел, так и для сопел и труб Вентури составляют 2 % и более. Соответственно, относительная погрешность измерения объёмного расхода газа по методу переменного перепада давления при выбранных условиях эксплуатации узла учёта не может быть менее этого значения, так как коэффициент влияния погрешности определения коэффициента расширения (см. (5)) на погрешность измерения объёмного расхода равен единице.

Полученные в статье результаты могут быть полезны разработчикам и конструкторам средств измерений и узлов учёта газа, работающих с применением метода переменного перепада давления, а также специалистам, занимающимся испытаниями и калибровкой этих средств измерений.

Литература

1. **ГОСТ 8.586.1–2005 (ИСО 5167-1:2003).** ГСИ. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 1. Принцип метода измерений и общие требования.
2. **ГОСТ 8.586.2–2005 (ИСО 5167-2:2003).** ГСИ. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 2. Диафрагмы. Технические требования.

3. **ГОСТ 8.586.3–2005 (ИСО 5167-3:2003).** ГСИ. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 3. Сопла и сопла Вентури. Технические требования.
4. **ГОСТ 8.586.4–2005 (ИСО 5167-4:2003).** ГСИ. Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 4. Трубы Вентури. Технические требования.
5. **Яворский Б. М., Пинский А. А.** Основы физики. Т. 1. М.: Наука, 1974.
6. **Стрелков С. П.** Механика. М.: Наука, 1975.
7. **СТО Газпром 2-3.5-051-2006.** Нормы технологического проектирования магистральных трубопроводов.
8. **Кэй Дж., Лэби Т.** Таблицы физических и химических постоянных. М.: ФИЗМАТЛИТ, 1962.
9. **МИ 2083–90.** ГСИ. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей.
10. **Гмурман В. Е.** Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высшая школа, 2002.
11. **ГОСТ 54500.3–2011.** Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределённости измерения.
12. **ISO/IEC Guide 98-3:2008.** Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM: 1995).
13. **РД 50-453–84.** Характеристики погрешности средств измерений в реальных условиях эксплуатации. Методы расчёта.
14. **ГОСТ 30319.2–2015.** Газ природный. Методы расчёта физических свойств. Вычисление физических свойств на основе данных о плотности при стандартных условиях и содержании азота и диоксида углерода.
15. **ГОСТ 30319.3–2015.** Газ природный. Методы расчёта физических свойств. Вычисление физических свойств на основе данных о компонентном составе.

Дата принятия: 14.01.2019.

Error estimation in measurements the expansion factor for standard pressure differential devices at working conditions gas metering station

V. I. Chesnokov, B. A. Ipolitov

All-Russian research institute of metrological service, Moscow, Russian Federation,
e-mail: chesnokov@vniims.ru, ipolitov@vniims.ru

Method of the differential pressure with standard nozzles and tubes Venturi has been considered. Based on the expression for expansion coefficient the assessments characteristics of the error in measurements expansion coefficient was obtained. Comparative analysis of the real and standard accuracy rates in definition expansion coefficient for various pressure differential devices has been made.

Key words: pressure differential method, expansion coefficient, gas metering station, working conditions, accuracy rates.