

Ф.С. Занько¹, Д.В.Кратиров², А.В.Мингалеев³, Н.И. Михеев¹, В.А.Фафурин³

¹Исследовательский центр проблем энергетики КазНЦ РАН, Казань, Россия

²Казанский национальный исследовательский технический университет им.А.Н.Туполева (КАИ), Россия

³Всероссийский научно-исследовательский институт расходометрии, Россия

МЕТОД ПЕРЕДАЧИ ЕДИНИЦ ОБЪЕМНОГО И МАССОВОГО РАСХОДОВ ГАЗА ОТ ПЕРВИЧНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ЭТАЛОНА РАБОЧИМ ЭТАЛОНАМ

АННОТАЦИЯ

Представлена методология для передачи единиц объемного и массового расхода от государственного первичного эталона рабочим эталонам сличением с помощью компаратора. Проведено теоретическое обоснование метода, численное моделирование. Поставлены эксперименты, подтверждающие правильность выбранных подходов. Компараторы внедрены в состав Государственного первичного эталона единиц объемного и массового расходов газа ГЭТ 118-2013.

1. ВВЕДЕНИЕ

Согласно федеральному закону «Об обеспечении единства измерений», единство измерений - это состояние измерений, при котором их результаты выражены в узаконенных единицах и погрешности измерений известны с заданной вероятностью [1].

Реализация положений этого федерального закона обеспечивается передачей единиц физических величин от государственного первичного эталона к рабочим средствам измерений. Выстраивается иерархическая поверочная схема, позволяющая путем многоуровневых сличений передавать единицу величины от более точных к менее точным средствам измерений. Поверочной схеме передачи единиц объемного и массового расходов газа присвоен статус национального стандарта [2]. В ней декларируется, что передача единиц от государственного первичного эталона, имеющего наивысшую точность, к рабочим эталонам может передаваться гравиметрическим (прямое взвешивание) методом либо с помощью компараторов.

Компаратор представляет собой устройство, чувствительное к передаваемой величине (в случае [2] к расходу газа) с известной формой передаточной функции. В силу того, что решается задача передачи единицы расхода первого уровня – от первичного эталона к рабочему, – требования к точности выяснения формы передаточной функции самые высокие. Следует отметить, что для компаратора важна именно форма передаточной функции, а не ее реальные градуировочные значения. Поэтому требования по точности, удовлетворяющие передачу единиц расхода между

эталонами целесообразно обеспечивать с помощью хорошо известного, теоретически и экспериментально обоснованного физического принципа.

Процедура сличения с помощью компаратора заключается в следующем. На первом этапе обеспечивается расход газа, последовательно проходящий через эталон верхнего уровня и компаратор. Характеристики эталона известны и получены в соответствии с [2] гравиметрическим способом. Фиксируются выходные сигналы компаратора и эталона.

Затем создается поток газа, проходящий через эталон нижнего уровня и компаратор. Снова фиксируются выходные сигналы. Используя известную форму передаточной функции компаратора, определяют характеристику эталона нижнего уровня.

В РФ главным звеном поверочной схемы единиц расхода газа является сопло, работающее на критическом режиме истечения. При гравиметрическом методе определения коэффициента расхода сопла воздух через сопло с обеспечением критического перепада давления закачивается в мерную емкость с известным объемом и взвешивается. Зная время заполнения, объем и массу прошедшего через сопло воздуха, переходят к объемному и массовому расходам газа.

Рабочие эталоны, также представляющие собой критические сопла, входят в состав поверочных установок в качестве образцовых (эталонных) расходомеров, и уже от них методом сличения производится передача единиц расхода газа рабочим средствам измерений.

Передача единицы расхода от одного критического сопла другому напрямую чрезвычайно затратно и требует значительных установленных мощностей компрессорной установки. Кроме того, согласно [3], у различных по форме проходного канала типов критических сопел различаются рабочие диапазоны чисел Рейнольдса. Последовательная установка образцового и поверяемого сопел, работающих в критическом режиме, как того требует схема сличения, не может обеспечить одинаковых чисел

Рейнольдса, что приводит к дополнительным погрешностям при передаче единиц.

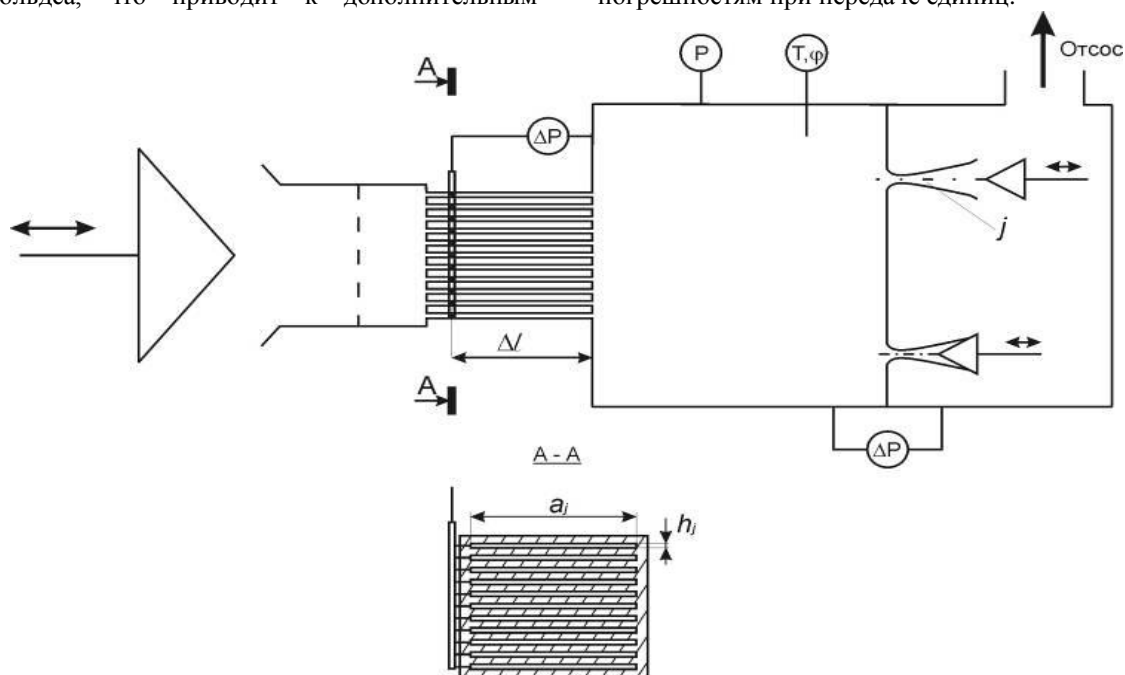


Рис.1. Схема модуля сличения

Поэтому передача единиц расходов от критического сопла, поверенного на исходном эталоне, к рабочему происходит с помощью компаратора. В качестве компаратора на сегодняшний день используется расходомер турбинного типа.

Однако, турбинный расходомер содержит две опоры вращения, в каждой из которых, строго говоря, коэффициенты трения неизвестны. Вследствие этого использование турбинного расходомера в качестве компаратора всегда будет связано с неопределенностью формы (у турбинного расходомера она линейная) его градуировочной характеристики и, что более критично, стабильности этой характеристики с течением времени.

2. ОБОСНОВАНИЕ И ВЫБОР МЕТОДА

Задача решалась на базе известного свойства ламинарного режима течения жидкости [4]. Согласно теории ламинарных течений, в зазоре между двумя стенками в прямоугольных трубах объемный расход газа через канал линейно связан с перепадом давления:

$$Q = \frac{h^3 a}{12 \mu \Delta l} \Delta p,$$

где h , a – высота и ширина канала, соответственно, м; Δl – длина канала, м; μ – динамическая вязкость воздуха, Па·с; Δp – перепад давления, Па.

Однако, строго линейная зависимость выполняется лишь на участке стабилизированного течения, после смыкания пограничных слоев. Длина начального участка (до установления

течения) зависит от числа Рейнольдса и определяется соотношением: $l_{нач}/d=0,029Re$.

Схема модуля сличения калибруемого сопла по набору эталонных сопел с использованием компаратора представлена на рис.1. Слева показан компаратор. Поток воздуха организуется с помощью компрессорной станции, работающей на всасывание. Через магистраль из ресивера модуля сличения воздух удаляется с обеспечением необходимого значения расхода и перепада давления. Таким образом, поток воздуха последовательно проходит через компаратор и критические сопла. Схематично показаны эталонные преобразователи расхода (критические сопла, далее ЭПР) и точки измерения параметров потока: Δp – перепад давления на компараторе, измеряется на участке длиной Δl развитого ламинарного течения в каналах компаратора, Па; p – абсолютное давление в ресивере модуля сличения, Па; T – температура воздуха, К; ϕ – относительная влажность воздуха при температуре T , %; Δp_c – перепад давления на критических соплах, Па.

Расход воздуха через модуль сличения задается либо набором открытых ЭПР, либо калибруемым соплом. Для увеличения диапазона расхода на передней стенке ресивера может быть установлен набор компараторов.

Каждое эталонное сопло с номером j характеризуется величиной объемного расхода Q_{0j} при температуре воздуха $+20^\circ\text{C}$ и относительной влажности 60%, полученной гравиметрическим способом на исходном эталоне.

Связь между приведенным к стандартным условиям (температуре воздуха +20°C и относительной влажности 60%) объемным расходом через ЭПР или поверяемое (калибруемое) сопло и перепадом давления на компараторе получим из баланса массовых расходов через ЭПР и компаратор. Запишем эту связь для ЭПР:

$$\sum_{i=1}^n \frac{Q_{0i}}{3600} K_{ai}^2 = \left(1 + \frac{0,5\Delta p}{p}\right) K_{\Gamma} \frac{\sum_{j=1}^m h_j^3 a_j K_{aj}^3}{\Delta l} \times \times \frac{z}{z_k} \sqrt{\frac{293,15}{T} \frac{K_{\varphi=60}}{K_{\varphi}} \frac{\Delta p}{12\mu}},$$

где K_{φ} - поправочный коэффициент на влажность воздуха при измеренных параметрах потока; $K_{\varphi=60}$ - поправочный коэффициент на влажность воздуха при условиях приведения объемного расхода ЭПР (влажность 60%, $t=20^\circ\text{C}$, $p=101325$ Па); φ - относительная влажность воздуха, %; t - температура воздуха в тракте установки, °C; Q_{0i} - объемный расход через i -е критическое сопло, м³/ч; n - количество включенных в работу критических сопел; K_{ai} - множитель, учитывающий температурное расширение материала критического сопла; z - коэффициент сжимаемости воздуха при параметрах в ресивере; p - абсолютное статическое давление воздуха в рассматриваемом сечении, Па; h_j , a_j - высота и ширина канала компаратора; Δl - длина каналов компаратора; m - число каналов компаратора; K_{Γ} - коэффициент, учитывающий отклонение геометрических размеров каналов компаратора; μ - динамическая вязкость воздуха, Па·с; K_{ai} - множитель, учитывающий температурное расширение материала компаратора; R - удельная газовая постоянная воздуха, Дж·кг/К; z_k - коэффициент сжимаемости воздуха при среднем давлении в компараторе ($p+0,5\Delta p$).

Связь приведенного объемного расхода через поверяемое (калибруемое) сопло $Q_{пов}$ с перепадом давления аналогична приведенной выше зависимости, но при параметрах потока с этим соплом и тем же самым компаратором (набором компараторов).

С учетом зависимости вязкости μ от температуры в приведенную выше зависимость для ЭПР температура входит как $T^{1,25}$. При возможности измерения T с абсолютной погрешностью 0,1 возникает довольно большая неопределенность расхода 0,04%.

При разработке модуля сличения необходимо принять меры по стабилизации температуры конструкции модуля и температуры воздуха в помещении, где он размещен. Геометрические размеры с учетом теплового расширения, динамическая вязкость воздуха и поправки на влажность при одинаковой температуре воздуха при работе модуля с эталонным и поверяемым соплами также будут одинаковы. Все это позволяет не использовать измеренные значения температуры для приведения

расхода. Результаты измерений необходимы только для контроля дрейфа температуры.

При одинаковой температуре при работе с ЭПР и поверяемым соплом уравнение для передачи единицы объемного расхода газа рабочим эталонам и рабочим средствам измерений примет вид:

$$Q_{0нов} = \sum_{i=1}^n Q_{0i} \frac{(1 + 0,5\Delta p_{нов}/p_{нов})(z/z_k)_{нов} \Delta p_{нов}}{(1 + 0,5\Delta p_{эм}/p_{эм})(z/z_k)_{эм} \Delta p_{эм}}$$

Относительный перепад давления на компараторе $\Delta p/p$ не превышает 0,01, а сами перепады давлений при работе модуля с ЭПР и поверяемым соплом из-за близости расходов через них будут отличаться в пределе не более чем на 20%. При этом комплекс $(z/z_k)_{пов}/(z/z_k)_{эт}$ будет отличаться от 1 не более, чем на 0,0001%, и им можно пренебречь. Комплекс $(1+0,5\Delta p_{пов}/p_{пов})/(1+0,5\Delta p_{эт}/p_{эт})$ может изменяться от 0,999 до 1,001, его следует учитывать. В результате, уравнение для передачи единицы объемного расхода газа при сличении через компаратор с одним набором ЭПР примет вид:

$$Q_{0нов} = \sum_{i=1}^n Q_{0i} \frac{(1 + 0,5\Delta p_{нов}/p_{нов}) \Delta p_{нов}}{(1 + 0,5\Delta p_{эм}/p_{эм}) \Delta p_{эм}}$$

Более точной является передача единицы объемного расхода газа при сличении через компаратор с двумя наборами ЭПР с расходами ($Q_{эт1}$ и $Q_{эт2}$) ниже и выше $Q_{пов}$. На каждом расходе надо провести не менее трех циклов таких измерений (рис.2).

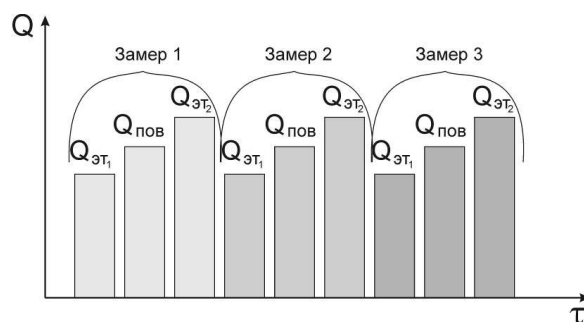


Рис.2. Циклограмма калибровки сопла на ЭУ2

Работа по такой циклограмме позволит максимально исключить влияние дрейфа температуры на результат калибровки.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА

Экспериментальная модель компаратора имела размеры щелевых каналов высотой $h=0,8$ мм, шириной $a=120$ мм, длиной $L=230$ мм. Испытания проводились с использованием ЭПР со следующими значениями расходов: 30,5244; 51,3588; 80,3973; 102,0822; 158,0 м³/ч. Число $Re \leq 2000$ по $d \approx 2h$ при Q_{max} .

Измерение перепада давления на компараторе производилось по схеме рис.1. Проведено две серии экспериментов при различной температуре воздуха в кондиционированном помещении.

Перепад давления измерялся датчиком Yokogawa EJX110A с погрешностью $\pm 0,04\%$, температура и влажность - датчиком ИПВТ-03-06 с погрешностями по температуре $\pm 0,2^\circ\text{C}$, по влажности $\pm 1,0\%$.

Полученные экспериментальные данные подтвердили, как и ожидалось, что связь перепада давления с расходом зависит от температуры воздуха, при этом сохраняется линейный характер функции $\Delta p(Q)$.

4. ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Методология использования компаратора с ламинарными каналами была реализована в ГЭТ 118-2013, модуль ЭУ2. Диапазон воспроизведения объемного расхода воздуха модуля ЭУ2, предназначенного для поверки (калибровки) эталонных преобразователей расхода на базе критических сопел, составлял от 1 до 1600 м³/ч.

ЭУ2 содержит систему термостабилизации и набор компараторов с динамическим диапазоном 3,2:1. Характеристики типоразмеров компараторов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Диапазон изменения расхода, м ³ /ч	Количество	Ширина компаратора мм	Число каналов
1 – 3,2	1	20	3
3,2 – 10	1	20	10
10 – 32	1	35	17
32 – 100	1	68	29
100 – 320	5	120	51

Для всех компараторов принята одинаковая высота каналов ($h=0,8$ мм), одинаковая длина каналов $D_f=230$ мм. Сечение отбора давления во всех случаях расположено на расстоянии 90 мм от входа в канал. Таким образом, перепад давления измеряется на длине 140 мм. На этой длине расчетный перепад давления при максимальном расходе составляет 850 Па, а общий перепад – около 1400 Па. Соответственно, при меньшем расходе перепады давления ниже пропорционально расходу.

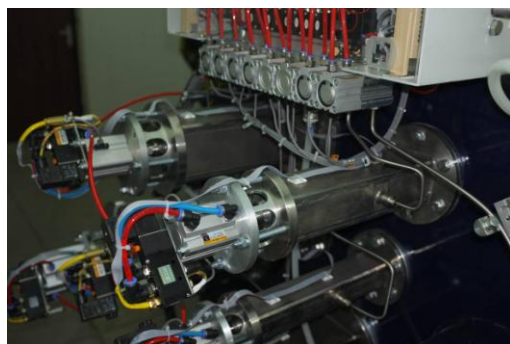


Рис.3. Внешний вид блока компараторов модуля ЭУ2 ГЭТ 118

Истечение воздуха из компаратора осуществляется непосредственно в ресивер. Поскольку струйки из каналов не присоединяются к стенкам, скоростной напор полностью теряется.

Подключение и отключение каждого компаратора производится запорной арматурой, в состав которой входит клапан, управляемый пневмоприводом и перекрывающий отверстие во входном фланце корпуса компаратора.

Относительное среднеквадратическое отклонение передачи единицы объемного расхода для установки ЭУ2 не превышает 0,022%.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Расчетными и экспериментальными исследованиями показано, что сличение расходов воздуха через эталонное сопло (набор эталонных сопел) и поверяемое (калибруемое) сопло можно осуществлять через компаратор, принцип действия которого основан на прямой пропорциональности перепада давления и расходом газа в каналах малого гидравлического диаметра при ламинарном режиме течения.

При этом в составе государственного первичного эталона ГЭТ118-2006 в диапазоне расходов от 1 до 1600 м³/ч для обеспечения среднеквадратического отклонения результатов измерений не более 0,04%, точность поддержания температуры поверочной среды в установке на временном интервале 1 час, обеспечиваемая системой автоматической стабилизации температуры поверочной среды, должна быть не более $\pm 2^\circ\text{C}$.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 13-08-97063-р_поволжье_a, 13-08-00359-а, 13-08-97050-р_поволжье_a, 13-08-00504-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Федеральный** закон РФ №102-ФЗ от 26 июня 2008 г «Об обеспечении единства измерений».
2. **ГОСТ Р 8.618-2006.** Государственная система обеспечения единства измерений. Государственная поверочная схема для средств измерений объемного и массового расходов газа.
3. **DS/EN ISO 9300:2007** Measurement of gas flow by means of critical flow Venturi nozzles.
4. **Башта Т.М.,** Руднев С.С., Некрасов Б.Б. и др. Гидравлика, гидравлические машины и гидравлические приводы. М.: Машиностроение, 1982. 423 с.