

Микросопловый компаратор для калибровки (поверки) критических микросопел

А. П. ГЕРАСИМОВ, А. В. КРАСАВИН, И. А. БЫКОВ

Всероссийский научно-исследовательский институт расходомерии,
Казань, Россия, e-mail: kras.84@mail.ru

Приведено расчетно-теоретическое обоснование возможности калибровки (поверки) критических микросопел методом компарирования при помощи микросоплового компаратора. Намечены операции методики выполнения измерений с применением указанного компаратора, изложены первые результаты исследований и приведена зависимость для расчетной оценки погрешности измерений этим методом.

Ключевые слова: расход газа, микросопло, компаратор, методика калибровки.

The calculative and theoretical justification of the possibility of calibration (verification) of critical micronozzles by comparison method by means of micronozzle comparator is presented. The measurement procedure operations with micronozzle comparator application are scheduled and the first results of studies are described. Based on the equation of measurements the dependence for calculated estimation of measurement errors by the micronozzle comparison method is presented.

Key words: gas flow rate, micronozzle, comparator, calibration procedure.

В настоящее время в системе метрологического обеспечения измерений расхода и количества газа ведущая роль отводится критическому соплу [1]. Нормативные документы [2, 3] позволяют проводить измерения расхода критическими расходомерами газа. Последние дают наилучшие результаты по точности при применении критических сопел, откалиброванных на эталонах единиц расхода газа [4]. Процедура калибровки критических сопел на исходной эталонной установке (ИЭУ) ГЭТ 118—2006 описана в [5], а в [6] проведена оценка неопределенностей измерений при калибровке критических сопел на этой установке.

За последние годы на государственном первичном эталоне единиц объемного и массового расходов газа ГЭТ 118—2006 ежегодно калибруются около 3000 критических сопел и микросопел. Разделение на критические сопла и микросопла достаточно условное. Критические микросопла, как правило, имеют пропускную способность по объемному расходу в диапазоне 0,003 — 4 м³/ч, а критические сопла — более 4 м³/ч. Эталонные критические сопла и микросопла служат основным средством передачи единицы от первичного эталона многочисленным рабочим эталонам 1-го разряда (поверочным установкам), которые находятся в разных регионах России и с успехом применяются для поверки промышленных и бытовых счетчиков газа, ротаметров, спирометров и других средств измерений.

Калибровка критических микросопел на ИЭУ чрезвычайно трудоемка и требует больших затрат времени. Всероссийский научно-исследовательский институт расходомерии (ВНИИР) — единственная в России организация, проводящая калибровку и поверку микросопел, поэтому очевидна актуальность повышения производительности этих работ и надежности их результатов. Для этой цели были проведены исследования специально разработанного устройства, которое обеспечивает быстрое выполнение работ по калибровке и поверке критических микросопел, входящих в со-

став многочисленных рабочих эталонов, путем сравнения их метрологических характеристик с метрологическими характеристиками эталонных микросопел, откалиброванных на ИЭУ. Это устройство было названо микросопловым компаратором (МСК).

Принцип действия МСК основан на зависимости между геометрическими и газодинамическими параметрами потока газа в канале между двумя последовательно включенными микросоплами с критическим режимом течения в каждом. На рис. 1 первое микросопло обозначено как эталонное, второе опорное. В качестве рабочей среды используется атмосферный воздух. Необходимый перепад давления для создания потока газа в МСК создается вакуумным насосом.

Массовые расходы воздуха через критическое эталонное $q_m^э$ и опорное $q_m^{оп}$ микросопла выражаются формулами

$$q_m^э = (\mu f_*)^э C_* p_B / \sqrt{T_B}; \quad q_m^{оп} = (\mu f_*)^{оп} C_* p^{оп} / \sqrt{T^{оп}}, \quad (1)$$

где $\mu^э$, $\mu^{оп}$, $(\mu f_*)^э$, $(\mu f_*)^{оп}$ — коэффициенты расхода и эффективные площади эталонного и опорного критических микросопел, соответственно; p_B , T_B — атмосферные давление и термодинамическая температура на входе в эталонное

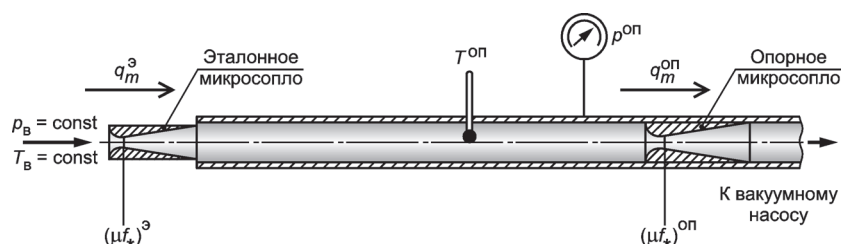


Рис. 1. Параметры потока в сопловом канале

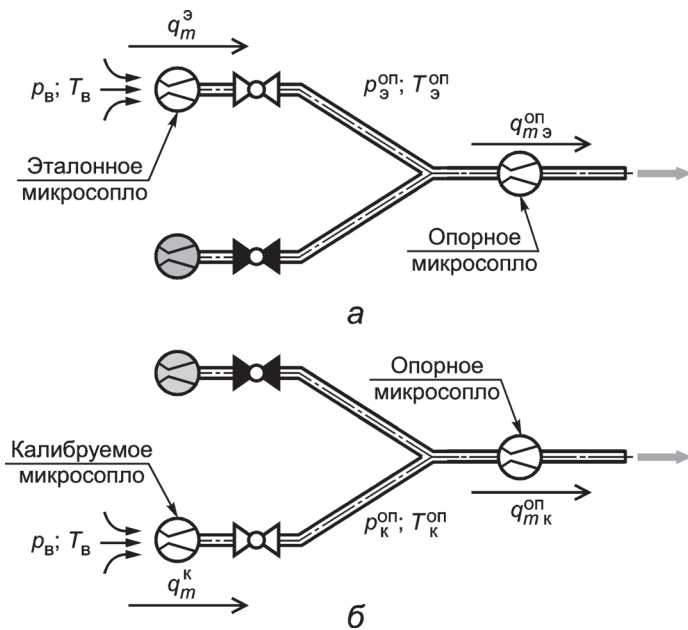


Рис. 2. Совместная продувка последовательно включенных микросопел:

а — эталонного и опорного; б — калибруемого (поверяемого) и опорного

критическое микросопло; $p^{оп}, T^{оп}$ — абсолютное давление и температура на входе в опорное микросопло;

$$C_{*i} = \left[k_i \left(2 / (k_i + 1) \right)^{(k_i + 1) / (k_i - 1)} \right]^{1/2}$$

— функция критического расхода; k_i — показатель изохоры совершенного газа.

В соответствии с равенством массовых расходов через эталонное и опорное микросопла можно получить из (1) зависимость абсолютного давления перед опорным микросоплом от эффективной площади эталонного микросопла:

$$p^{оп} = \left[p_B \sqrt{T^{оп} / T_B} / (\mu f_*)^{оп} \right] (\mu f_*)^3. \quad (2)$$

Если допустить, что в (2) все заключенные в квадратные скобки параметры постоянны, то станет очевидным утверждение о линейной зависимости между опорным давлением $p^{оп}$ и $(\mu f_*)^3$. При этом, если $(\mu f_*)^3$ растет, то $p^{оп}$ падает, и наоборот.

Микросопловый компаратор — это устройство для сравнения калибруемого (поверяемого — далее опущено) и эталонного микросопел. На основе результатов измерений давлений p_3^K и $p_3^{оп}$ перед одним и тем же опорным микросоплом во время поочередных продувок указанных микросопел определяют пропускную способность калибруемого микросопла по объемному расходу q_{VCT}^K , приведенному к стандартным условиям $p_{CT} = 760$ мм. рт. ст. (101325 Па), $T_{CT} = 293,15$ К (20 °С).

Обозначим $q_m^3, q_m^{оп}, q_m^K$ — массовые расходы через эталонное, опорное и калибруемое микросопла, соответствен-

но; q_{VCT}^3, q_{VCT}^K — пропускные способности эталонного и калибруемого микросопел по объемному расходу при стандартных условиях; $p_3^{оп}, p_3^K$ — давления перед опорным микросоплом при продувке эталонного и калибруемого микросопел.

Процедура компарирования на МСК включает два этапа измерений. На первом этапе проточный канал, в котором установлено калибруемое микросопло, перекрыт, и поток воздуха проходит последовательно через эталонное и опорное микросопла (рис. 2, а). Так как $q_m^3 = q_{m3}^{оп}$, расход можно выразить через параметры опорного микросопла:

$$q_m^3 = (\mu f_*)^{оп} C_* \left(p_3^{оп} / \sqrt{T_3^{оп}} \right). \quad (3)$$

На втором этапе, наоборот, эталонное микросопло отключается, калибруемое подключается последовательно с опорным (рис. 2, б). В этом случае поток воздуха последовательно проходит через калибруемое и опорное микросопла.

Массовый расход газа через калибруемое микросопло можно выразить, используя параметры опорного микросопла при условии $q_m^K = q_{mK}^{оп}$:

$$q_m^K = (\mu f_*)^{оп} C_* \left(p_K^{оп} / \sqrt{T_K^{оп}} \right). \quad (4)$$

Из (3), (4) получим

$$q_m^K = q_m^3 p_K^{оп} / p_3^{оп},$$

аналогично для объемного расхода

$$q_{VCT}^K = q_{VCT}^3 p_K^{оп} / p_3^{оп}.$$

Давления в межсопловом канале $p_3^{оп}, p_3^K$ определяют по результатам измерений атмосферного давления p_B барометром и разности Δp между p_B и давлением перед опорным микросоплом при использовании дифференциального датчика давления т. е. $p^{оп} = p_B - \Delta p$. Тогда уравнение измерений МСК преобразуется к виду

$$q_{VCT}^K = q_{VCT}^3 (1 - \Delta p_K / p_B) / (1 - \Delta p_3 / p_B). \quad (5)$$

Принципиальная схема МСК приведена на рис. 3. Для компарируемых микросопел — калибруемого и одного или нескольких эталонных — предусмотрены четыре посадочных гнезда 1. Они смонтированы на входных патрубках запорных кранов 1⁺, ..., 4⁺. Выходные патрубки этих кранов подключены к входному коллектору 2, сообщаемому с выходным коллектором 3 по восьми параллельным, изолированным одна от другой трубкам, в которых смонтированы опорные микросопла МСО-1, ..., МСО-8. Пропускные способнос-

ти $МСО_j$ также определены на эталоне и соответственно составляют $q_{VCT}^{оп} = 0,0066; 0,0322; 0,0501; 0,0832; 0,2145; 0,4239; 1,753; 2,000 \text{ м}^3/\text{ч}$. Любое из опорных микросопел или любое требуемое по условиям измерений сочетание из них может быть включено в работу при помощи выходных запорных кранов $1^- \dots, 8^-$.

В состав МСК входит комплект из сменных девяти эталонных критических микросопел МСЭ с пропускными способностями $q_{VCT}^э = 0,0031; 0,0163; 0,0257; 0,0408; 0,1073; 0,2115; 0,5170; 1,034; 2,060 \text{ м}^3/\text{ч}$ (на рис. 3 не показаны). Микросопла МСЭ_i откалиброваны на ИЭУ. Одновременно в работу можно включить до трех эталонных микросопел.

Выходной коллектор 3 через запорный кран 5 связан с генератором расхода поверочной среды (на рис. 3 не показан), в состав которого входят вакуумный насос, буферная емкость, элементы контроля и автоматического поддержания заданного разрежения в генераторе. Разрежение в генераторе $p_{вак}$ контролируется вакуумметром 6. Атмосферное давление измеряется барометром 7. К коллектору 2 подключен дифференциальный датчик давления 8, который служит для определения абсолютного давления перед опорным микросоплом $p^{оп} = p_в - \Delta p$. Входной коллектор 2 и соединительные трубки с вмонтированными в них опорными микросоплами погружены в бассейн термостата 4, заполненный водой комнатной температуры. Назначение термостата состоит в уравнивании температуры воздуха на входе последовательно включенных компарируемых и опорных критических микросопел.

Расчетную оценку давления перед опорным микросоплом и соотношение между пропускными способностями эталонного или калибруемого и опорного микросопел для обеспечения критического режима течения в каждом из последовательно включенных микросопел можно найти с использованием зависимости (2), приведенной к виду

$$p^{оп} = p_в \sqrt{T^{оп} / T_в} (\mu f_*)^э / (\mu f_*)^{оп}.$$

Так как $T^{оп} < T_в$ и, если необходимо, чтобы $p^{оп} = 0,528 p_в$, нужно обеспечить $(\mu f_*)^{оп} \leq 1,9 (\mu f_*)^э$ или $q_{VCT}^{оп} \leq 1,9 q_{VCT}^э$.

Поскольку на каждом этапе измерений при калибровке критического микросопла в сопловом канале последовательно установлены два микросопла, то абсолютное давление в выходном коллекторе МСК должно быть $p_a \leq 0,28 p_в$. Другими словами показание стрелочного вакуумметра $p_{вак} = -72 \text{ кПа}$ и более, т. е. стрелка должна располагаться в промежутке между -72 и -100 кПа .

Для сохранения критического режима течения в двух последовательно установленных на обоих этапах измерений критических микросопел важно, чтобы пропускные способ-

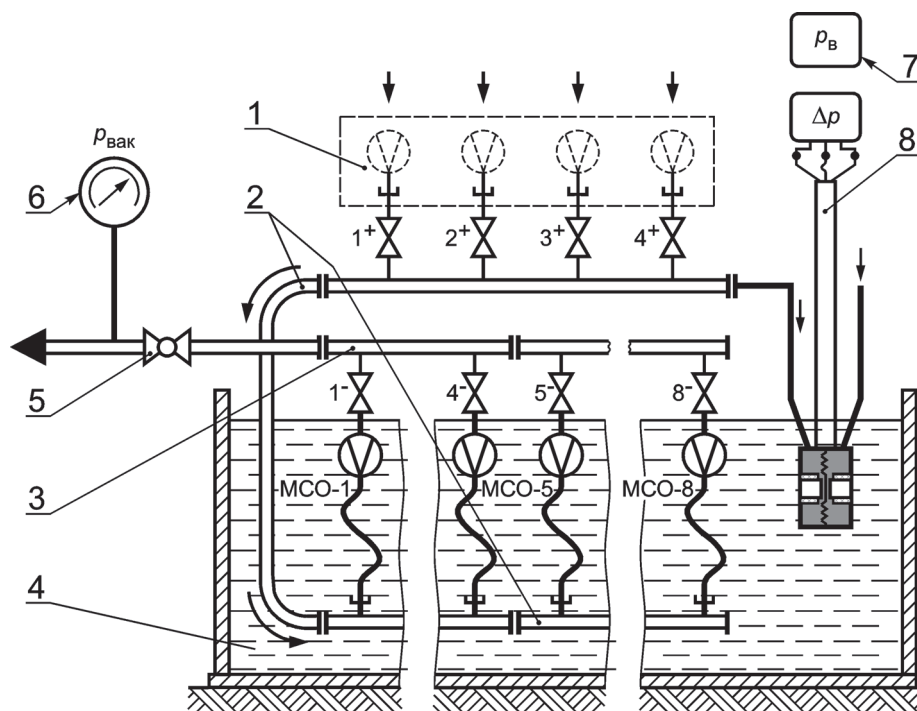


Рис. 3. Принципиальная схема микросоплового компаратора:

1 — посадочные гнезда для компарируемых микросопел; 2, 3 — входной и выходной коллекторы; МСО-1, ..., МСО-8 — опорные микросопла; 4 — бассейн термостата; 5 — запорный кран; 6 — вакуумметр; 7 — барометр; 8 — дифференциальный датчик давления; $1^+, \dots, 4^+$ — входные запорные краны; $1^-, \dots, 8^-$ — выходные запорные краны

ности эталонных и калибруемых микросопел $q_{VCT}^э \approx q_{VCT}^к$. Для этого можно использовать совместно до трех параллельно включенных сменных эталонных микросопел из девяти входящих в состав МСК.

При необходимости вместо одного опорного микросопла можно использовать сочетание из двух-трех и более микросопел из состава МСК так, чтобы, как было показано ранее,

$$\sum_{j=1}^8 q_{VCTj}^{оп} \leq 1,9 \sum_{i=1}^3 q_{VCTi}^э.$$

Для измерения Δp при совместной продувке последовательно включенных эталонного и опорного микросопел, а также калибруемого и опорного применяли датчик давления Метран-100-ДД, модель 1442 с верхним пределом измерений 100 кПа . Для исследований МСК был выбран метод, основанный на определении заведомо известных расходных характеристик микросопел путем их компарирования. Объектами сравнения служили два микросопла 1-ЭД4 и 1-ЭД8, пропускные способности которых установлены по результатам калибровки методом масса-время на ИЭУ [5].

Микросопло 1-ЭД8 с пропускной способностью $(q_{VCT}^э)_{ИЭУ} = 1,0343 \text{ м}^3/\text{ч}$ принято условно в качестве эталонного, другое

1-ЭД4 назначено объектом калибровки методом компарирования, т. е. поставлена задача на МСК экспериментально определить его пропускную способность согласно (5).

Результаты калибровки микросопла 1-ЭД4 $(q_{VCT}^K)_{МСК}$, полученные методом компарирования в нескольких сериях измерений, отличаются от его пропускной способности $(q_{VCT}^3)_{ИЗУ}$, определенной на ИЗУ, не более, чем на 0,07 %, или $(q_{VCT}^K)_{МСК} = 1,0007 (q_{VCT}^3)_{ИЗУ}$.

Причина таких незначительных систематических расхождений между результатами калибровки одного и того же микросопла различными методами заключается, по-видимому, в пренебрежении изменением температуры воздуха в сопловом канале МСК:

$$q_{VCT}^K = q_{VCT}^3 \left(p_K^{оп} / p_3^{оп} \right) \sqrt{T_3^{оп} / T_K^{оп}}.$$

Расчетную оценку погрешности метода измерений с помощью МСК можно осуществить, исходя из уравнения (5). Его логарифмируют, дифференцируют, упрощают и, пренебрегая членами второго порядка малости, и получают выражение для предела относительной погрешности определения пропускной способности калибруемого микросопла:

$$\delta q_{VCT}^K = \sqrt{[\delta q_{VCT}^3]^2 + 4[\delta \Delta p]^2 + [\delta p_B]^2},$$

где δq_{VCT}^3 , $\delta \Delta p$, δp_B — пределы относительной погрешности пропускной способности эталонного микросопла, результатов измерений перепада давления и атмосферного давления.

Если оперировать неопределенностями, то оценить весь спектр неопределенностей определения q_{VCT}^K можно по известным правилам [6].

Результаты экспериментального определения пропускной способности калибруемого (поверяемого) микросопла по объемному расходу q_{VCT}^K , приведенному к стандартным условиям, с помощью МСК позволяют рекомендовать его к

внедрению в метрологическую практику. Применение МСК для выполнения калибровочных и поверочных работ в диапазоне расходов 0,003—2 м³/ч позволит существенно сократить время на выполнение этих работ и повысить производительность труда при калибровке (поверке) критических микросопел.

Для получения лучших точностных результатов при калибровке критических микросопел на МСК необходимо использовать приборы для измерения перепада давления высокого класса точности, например датчик перепада давления типа YokogawaEJX с нужным верхним пределом измерений. Кроме того, целесообразно предусмотреть измерение температуры рабочей среды во входном коллекторе МСК перед опорными микросоплами.

Л и т е р а т у р а

1. Герасимов А. П. и др. Свойства потоков газа при различных режимах течения через сопла Лаваля // Измерительная техника. 2005. № 4. С. 40—44; Gerasimov A. P. et al. The Properties of Gas Flows for Different Flow Conditions Through Laval Nozzles // Measurement Techniques. 2005. V. 48. N. 4. P. 367—373.
2. МИ 1538—86. ГСИ. Критические расходомеры. Методика выполнения измерений массового расхода газа.
3. ISO 9300:1990 (E). Measurement of gas flow by means of critical flow Venturi nozzles.
4. Герасимов А. П., Красавин А. В. Калибровка критических сопел на эталонах единиц расхода газа // Измерительная техника. 2013. № 10. С. 36—39; Gerasimov A. P., Krasavin A. V. Calibration of Critical Nozzles on Standards of the Units of the Rate of Flow of a Gas // Measurement Techniques. 2013. V. 56. N. 10. P. 1146—1149.
5. Красавин В. М. и др. Исходная эталонная установка государственного первичного эталона единиц объемного и массового расходов газа ГЭТ 118—2006. Процедура калибровки критических сопел // Вестник Казан. технол. ун-та. 2013. Т. 16. № 10. С. 285—288.
6. Красавин В. М. и др. Оценивание неопределенностей измерений при проведении калибровки критических сопел на исходной эталонной установке ГЭТ 118—2006 // Вестник Казан. технол. ун-та. 2013. Т. 16. № 13. С. 193—197.

Дата принятия 30.12.2013 г.