

Рис. 4. Теоретическая зависимость нестабильности от времени измерения

Л и т е р а т у р а

1. Wang R. T., Dick G. J. Cryocooled sapphire oscillator with ultrahigh stability // IEEE Trans. Instrum. Meas. 1999. V. 48. P. 528—531.
2. Риле Ф. Стандарты частоты. Принципы и приложения. М.: Физматлит, 2009.
3. Donley E. A. e. a. Progress Towards the Second-Generation Atomic Fountain Clock at NIST // Proc. IEEE Intern. Freq. Control Symp. and Exposition. 2004. P. 82—86.
4. Ovchinnikov Y., Marra G. Accurate rubidium atomic fountain frequency standard // Metrologia. 2011. V. 48. P. 87—100.

5. Mattison E. M., Vessot R. F. C., Shen W. Single-State Selection System for Hydrogen Masers // IEEE Trans. Ultrason., Ferroel., and Freq. Control. 1987. V. UFFC-34. N 6. P. 622—637.
6. Urabe S. e. a. Majorana Effect on Atomic Frequency Standards // IEEE Trans. Instrum. Meas. 1980. V. IM-29. N 4. P. 304—310.
7. Kleppner D. e. a. Hydrogen-Maser Principles and Techniques // Phys. Rev. 1965. V. 138. N 4A. P. 972—983.
8. Allison A. C. Spin-Change Frequency Shifts in H-H Collisions // Phys. Rev. 1972. V. 5. N 6. P. 2695—2696.
9. Kleppner D., Goldenberg H. M., Ramsey N. F. Theory of the Hydrogen Maser // Phys. Rev. 1962. V. 126. N 2. P. 603—615.
10. Рамзей Н. Молекулярные пучки. М.: ИИЛ, 1960. С. 25—30.
11. Пихтелев А. И., Ульянов А. А., Фатеев Б. П. Стандарты частоты и времени на основе квантовых генераторов и дискриминаторов. М.: Сов. радио, 1978. С. 58—75.
12. Троицкий В. С. Направленность молекулярного пучка, образованного истечением газа из канала // ЖТФ. 1962. Т. 32. № 4. С. 488—502.
13. Бойко А. И. Водородный генератор для стандарта частоты на фонтане атомов цезия // Труды ВНИИФТРИ. 2005. Вып. 50 (142). С. 100—112.

Дата принятия 25.06.2013 г.

МЕХАНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

681.121

Калибровка критических сопел на эталонах единиц расхода газа

А. П. ГЕРАСИМОВ , А. В. КРАСАВИН

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

Показано взаимодействие эталона и калибруемого критического сопла, а также применение откалиброванных на эталоне критических сопел для передачи единицы от эталона нижестоящим средствам измерений.

Ключевые слова: критическое сопло, калибровка, передача размера единицы расхода.

The interaction of standard and calibrated critical nozzle and also an application of calibrated on the standard critical nozzles for transmission of the unit from the standard to subordinate measuring instruments are shown.

Key words: critical nozzle, calibration, transmission of flow unit.

Среди технических средств системы метрологического обеспечения измерений расхода газа, сложившейся к настоящему времени, ведущая роль отводится критическому соплу. Его функции может выполнять сужающийся или сужающе-расширяющийся канал, на входе которого давление газа больше давления среды на его выходе. В сужающемся канале с переменным в осевом направлении поперечным сечением скорость потока нарастает в зависимости от из-

менения его поперечного сечения. При достаточно большом перепаде давлений скорость потока может достичь в наиболее узком выходном сечении (в горле сопла) скорости звука. Дальнейшее увеличение скорости с ростом перепада давления невозможно.

Такое сопло называют звуковым, скорость потока, равную местной скорости звука, — критической, а сечение сопла, в котором скорость потока достигает местной скорости

звука, — критическим. Ускорение потока в горле сопла до скорости звука и получение критического (запертого) течения позволяет определить звуковое сопло как критическое. Если критическое сопло представляет собой сужающе-расширяющийся канал, то при достаточно большом перепаде давлений скорость потока в критическом сечении достигает критической скорости и сверхзвуковых (сверхкритических) значений в расширяющемся выходном диффузоре. Это так называемое сверхзвуковое сопло.

В [1] подробно проанализированы возможные режимы течения газа через сопло Лаваля и выделена область рабочих режимов, для которых характерно наличие в потоке участка сверхзвуковых скоростей между звуковой поверхностью в горле сопла и скачком уплотнения в выходном диффузоре. Критическое сечение звукового сопла и участок сверхзвуковых скоростей выполняют роль «обратного клапана» для возмущений, которые могут возникать ниже выходного сечения сопла. В этом случае изменение противодавления не приводит к изменению расхода газа через сопло. Конечно, это наблюдается при постоянных параметрах состояния рабочей среды перед входным сечением сопла.

Применительно к критическим расходомерам [2, 3] уравнение измерений массового расхода газа имеет вид

$$q_m = \left[CA_* C_{*i} \xi / \sqrt{R} \right] p_0 / \sqrt{T_0}, \quad (1)$$

где C , ξ — газодинамический и термодинамический коэффициенты расхода; A_* — площадь критического сечения со-

пла; $C_{*i} = \left[\left(\frac{2}{k_i+1} \right)^{\frac{k_i+1}{k_i-1}} k_i \right]^{1/2}$ — функция критического расхода;

k_i — показатель изоэнтропы совершенного газа; R — удельная газовая постоянная; p_0 , T_0 — давление и температура в изоэнтропически заторможенном потоке газа на входе сопла.

Если проанализировать погрешности, с которыми можно определить каждую составляющую в комплексе $[CA_* C_{*i} \xi / \sqrt{R}]$, и оценить суммарную погрешность, то полученный результат заставит отказаться от всех положительных качеств критического сопла, а критический расходомер отнести к числу заурядных средств измерений (СИ). Так, погрешность газодинамического коэффициента расхода C , рассчитанного согласно критериальной зависимости, рекомендованной международным стандартом [3], составляет $\pm 0,3\%$ с доверительной вероятностью 0,95. И это при достаточно жестких требованиях к качеству и точности изготовления проточного канала сопла. К аналогичному результату приводит анализ погрешностей определения всех других величин в указанном комплексе [:] (см. (1)).

Не желая жертвовать редкими свойствами критических сопел, учеными и инженерами Франции (фирма Gas de France) [4], США (NBS) [5], Великобритании (NEL) [6] были созданы национальные эталоны, специально предназначенные для калибровки критических сопел. В СССР аналогичные эталоны появились в 70-е годы прошлого столетия в ЦИАМ им. П. И. Баранова [7], Казанском филиале ВНИИФТРИ [8], КБ «Химавтоматика» и ряде других организаций. Впоследствии они были утверждены в качестве первичного и рабочих эталонов единицы массового расхода газа и возглавили общесоюзную [9] и отраслевые поверочные схемы для СИ массового расхода газа.

Во всех эталонах заполнение газосборных сосудов (ГСС) осуществляют через критическое сопло. Оно, выполняя функцию дозатора расхода, обеспечивает постоянный расход и, как правило, также является объектом калибровки. В эталоне NBS в качестве метода измерений заложен $p = T$ — V-метод; в эталоне Gas de France — $p = V$ -метод. Это косвенные методы. В их основе лежит уравнение состояния $p = p/(RT)$ и уравнение $m = \rho V$, соответственно. (Здесь p , m — плотность и масса газа; V — объем ГСС.) Оба метода предполагают, что объемы ГСС известны.

В «гравиметрическом» эталоне NEL ГСС установлен на платформе весов, причем масса находящегося в нем газа измеряется вместе с его собственной массой. В NEL, как и в отечественных эталонах, реализован абсолютный метод измерения расхода, т. е. номенклатура и алгоритм измерительных операций соответствуют математическому определению понятия «расход»: $q_m = m/t$. Отечественные эталоны [7, 8] содержат устройства гидростатической компенсации массы ГСС и других конструктивных элементов подвижной системы весоизмерительного узла.

В период 2002—2006 гг. были проведены кардинальные конструктивные доработки: изменен состав государственного первичного эталона единицы массового расхода газа ГЭТ 118—79 [9], подключена и использована в качестве генератора расхода новая система создания потока рабочей среды, применена новая элементная база, использованы современные высокоточные СИ, пересмотрены правила хранения (теперь содержания) и применения эталона, всесторонне исследованы его метрологические характеристики, разработан национальный стандарт на государственную поверочную схему для СИ объемного и массового расходов газа. При этом существенно (в 9,3 раза) расширен диапазон расходов, воспроизводимых эталоном, улучшены его метрологические характеристики, процесс проведения измерений практически полностью автоматизирован вплоть до выдачи сертификата калибровки.

На рис. 1 приведены основные составные элементы исходной эталонной установки государственного первичного эталона единиц объемного и массового расходов газа ГЭТ 118—2006 [10], утвержденного 12.09.2006 г. Приказом № 2455 Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии.

Гидростатическая компенсация обеспечивает свободное, без трения и упругих деформаций перемещение подвижной системы весоизмерительного узла и возможность оптимального согласования диапазона измерений весов с измеряемой массой газа m^3 . Например, в исходной эталонной установке (см. рис. 1) для измерения массы воздуха 900—1200 г, которым можно заполнить ГСС, используются весы с верхним пределом измерений 1500 г.

При калибровке поток рабочей среды пропускают через последовательно соединенные критическое сопло и этalon (рис. 2). Из равенства $q_m = q_m^3$ с учетом (1) получим

$$\left[(CA_*) C_{*i} \xi / \sqrt{R} \right]^3 = q_m^3 \sqrt{T_0^3 / p_0^3}, \quad (2)$$

где верхним индексом «3» отмечены величины, измеренные во время калибровки сопла на эталоне высокоточными СИ из его состава.

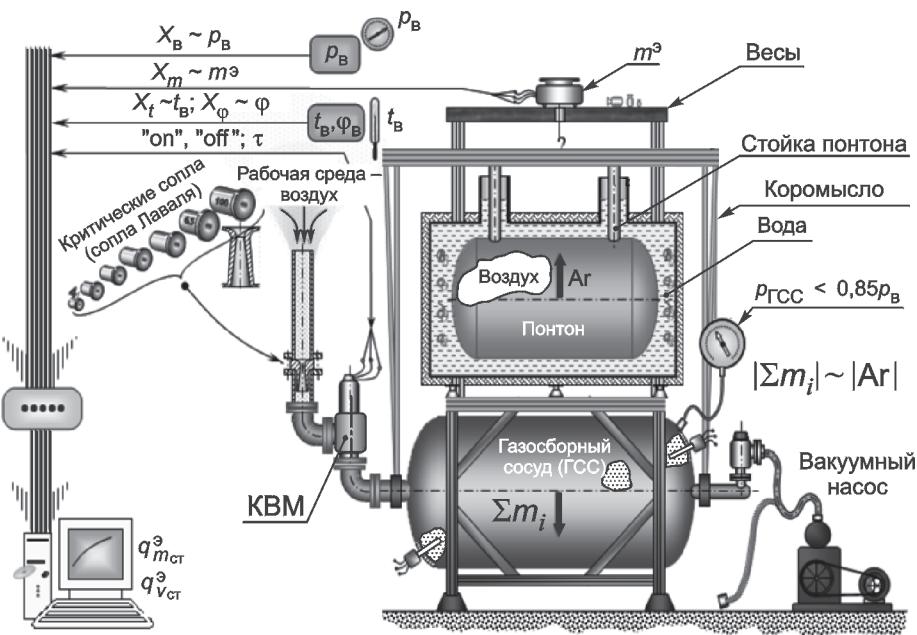


Рис. 1. Основные составные элементы исходной эталонной установки ГЭТ 118—2006: Σm_i — суммарная масса конструктивных элементов подвижной системы весоизмерительного узла; Ar — архимедова сила; КВМ — вакуумный клапан с электромагнитным приводом; p_B , t_B , φ_B — давление, температура и влажность атмосферного воздуха

Равенство (2) записано для случая, когда требуется экспериментально определить значение комплекса в квадратных скобках с тем, чтобы упростить уравнение измерений (1), представив его в виде

$$q_m = K_m^3 p_0 / \sqrt{T_0}.$$

При выполнении операций, регламентированных поверочной схемой [11], а именно, воспроизведения единицы, хранения и передачи ее подчиненным СИ, уравнения измерений массового и объемного расходов газа целесообразно представить следующим образом:

$$q_m = q_{m\text{ст}}^3 \left[(p_0 / p_{\text{ст}}) \sqrt{T_{\text{ст}} / T_0} \right]; q_V = q_{V\text{ст}}^3 \sqrt{T_0 / T_{\text{ст}}},$$

где $q_{m\text{ст}}^3 = q_m^3 \left[(p_{\text{ст}} / p_0^3) \sqrt{T_0^3 / T_{\text{ст}}} \right]$, $q_{V\text{ст}}^3 = q_m^3 \left(R / p_0^3 \right) \sqrt{T_{\text{ст}} T_0^3}$

— пропускные способности сопла по массовому и объемному расходам, приведенные к стандартным условиям измеряемой среды $p_{\text{ст}} = 760$ мм рт. ст. (101325 Па), $T_{\text{ст}} = 293,15$ К (20°C).

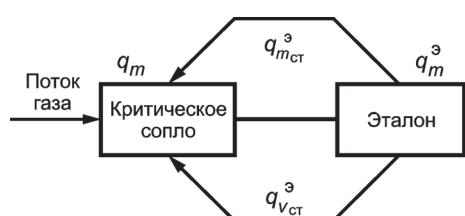


Рис. 2. Схема взаимодействия эталона с калибруемым критическим соплом

Каждому конкретному критическому соплу присущи свои индивидуальные, сохраняющиеся в пространстве и во времени значения $q_{m\text{ст}}^3$ и $q_{V\text{ст}}^3$. Стандартная расширенная неопределенность экспериментального определения численных значений этих величин на эталоне ГЭТ 118—2006 составляет 0,08—0,1 % при доверительной вероятности 0,95. Откалиброванные на эталоне критические сопла используют в составе рабочих эталонов 1-го разряда и рабочих критических расходомеров.

В настоящее время в России создана достаточно развитая система метрологического обеспечения измерений расхода и количества газа. Среди технических средств, необходимых для достижения единства и требуемой точности измерений, центральное место занимает государственный первичный эталон единиц объемного и массового расходов газа ГЭТ 118—2006. Рабочие эталоны, созданные и введенные в эксплуатацию в течение последних 20 лет, включают более 130 поверочных установок для поверки промышленных счетчиков газа, около 250 поверочных установок для поверки бытовых счетчиков газа, 12 заводских испытательных стендов для настройки и первичной поверки бытовых счетчиков газа при их серийном производстве. Всем перечисленным поверочным установкам, заводским испытательным стендам и рабочим критическим расходомерам единица расхода передается при калибровке входящих в их состав эталонных критических сопел от государственного первичного эталона через пропускные способности критических сопел по массовому и объемному расходам при стандартных условиях, значения которых определены экспериментально на эталоне ГЭТ 118—2006.

Критические расходомеры являются важнейшим элементом метрологической инфраструктуры, обеспечивающей единство измерений расхода и количества газа. Их применение позволяет определить расход газа с высокой точностью и надежностью. Критические расходомеры состоят из критического сопла, которое создает зону низкого давления, и измерительного устройства, которое определяет расход газа на основе измерения разницы давлений между рабочим и измерительным сечениями сопла. Критические расходомеры могут быть использованы для измерения расхода газа в различных отраслях промышленности и транспорта.

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. e. a. 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. Castillon Ph. Mise au point d'un étalon de débit constitue déterminé en régime sonique // Ass. Techn. de L'Ind. du Gas de France, Congr. 1970. P. 35.

5. Ruegg F. W., Shafer M. R. Flow Measurement: Procedures and facilities at the National Bureau of Standards // Proc. Symp. Flow Measur, San Francisco, CA, Jan. 19—22, 1970. Chap. in ASHRAE (Amer. Soc. Heat Refrig. Air-Cond. Eng.), Bull. Flow Measur. Pt. 1. 1972. P. 1—8.

6. Brain T. O. Y. S., Macdonald L. M. Evaluation of the performance of small scale critical flow Venturis using the NEL gravimetric gas flow standard test facility // Fluid Flow Measurement in the Mid — 1970's: Proc. Conf. NEL, Apr. 8—10, 1975. Edinburg, 1977. V. 1. P. 107—129.

7. А. с. 329400 СССР. Весовая испытательная установка для статической градуировки газовых расходомеров / К. К. Боков, Ю. Ф. Мишин, В. С. Симакин // Бюл. изобрет. 1972. № 7.

8. Герасимов А. П. и др. Государственный первичный эталон единицы массового расхода газа в диапазоне $4 \cdot 10^{-2} - 4 \cdot 10^{-1}$ кг/с // Метрология и точные измерения. 1980. № 5.

9. ГОСТ 8.369—79. ГСИ. Государственный первичный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений массового расхода газа в диапазоне $4 \cdot 10^{-2} \div 2,5 \cdot 10^2$ кг/с.

10. Герасимов А. П. и др. Государственный первичный эталон единиц объемного и массового расходов газа // Мир измерений. 2006. № 7. С. 10—11.

11. ГОСТ Р 8.618—2006. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений объемного и массового расходов газа.

Дата принятия 18.07.2013 г.

621.3.083.8:551.54

Согласование тонкопленочного емкостного датчика давления с внешней цепью и его частотная характеристика

А. А. КАЗАРЯН

Центральный аэрогидродинамический институт, Жуковский, Россия,
e-mail: wtdiv@tsagi.ru

Указаны условия согласования датчика и усилителя при больших расстояниях между ними. Приведены особенности частотной характеристики тонкопленочных емкостных датчиков пульсаций давлений. Рекомендован способ сглаживания частотной характеристики измерительного канала в диапазоне звуковых частот.

Ключевые слова: датчик давления, амплитудно-частотная характеристика, сглаживание, суммирование сигналов.

The conditions of sensor and amplifier coordination at big distances between them are described. The features of frequency characteristic of thin film capacitive pressure pulsations sensors are presented. A method of smoothing of measuring signal frequency characteristic in audio frequency range is recommended.

Key words: pressure sensor, amplitude-frequency characteristic, smoothing, signals summation.

Тонкопленочный емкостный датчик (ТЕД) предназначен для измерения быстропрерывного давления на поверхности испытуемого объекта без ее предварительной механической обработки. Благодаря гибкости и компактности датчик можно произвольно размещать на изделии с большой кривизной в труднодоступных местах, на тонких профилях и т. д. Основу ТЕД составляют пленка из полимида и мембрана из железнозникелевого или никелевого сплава [1—4]. Отметим, что в ТЕД отсутствует явление дрейфа нуля. Конструктивно ТЕД имеют одночное и матричное исполнение с количеством чувствительных элементов на одной подложке от одного до десяти и больше.

Использование ТЕД для измерения пульсаций давления связано с нормированием его метрологических характеристик после установки на исследуемый объект. Поэтому важны систематические исследования ТЕД на этапах его разработки, освоения технологии производства, испытаний образцов, которые позволили бы с достаточной достоверностью перенести полученные метрологические характеристики на отдельный экземпляр датчика и ограничить количество нормируемых характеристик [1].

Цель данной работы — повышение точности и надежности измерительной аппаратуры, содержащий ТЕД, защита

высокоомной электрической цепи от влияния внешних электромагнитных, синфазных помех и сглаживание неравномерности АЧХ в диапазоне звуковых частот для измерения низких и высоких уровней звукового давления на больших и малых расстояниях.

Согласование существующих традиционных объемных емкостных датчиков и микрофонов с внешней цепью в большинстве случаев осуществляют усилителем заряда (УЗ). Как правило, емкостные микрофоны, например, фирмы «Брюль и Кьер» (Дания), RION (Япония), RFT (Германия) поляризованы напряжением постоянного тока 200 В или не поляризованы (электретные, пьезопироэлектрические и акселометры). Конструктивно мембрана емкостных микрофонов находится в одном корпусе с УЗ. В этом случае высокоомная цепь между микрофоном и усилителем защищена от влияния внешних электромагнитных и синфазных помех [4, 5].

Условия согласования ТЕД с внешней цепью, т. е. выхода ТЕД со входом УЗ, могут отличаться. Если чувствительный элемент (мембрана) ТЕД размещен вне корпуса УЗ на расстоянии 0,3—20 м и дальше, то защита высокоомной цепи от проникновения внешних электромагнитных и синфазных помех усложняется. Очевидно, синфазные помехи и сетевые частотой 50 Гц являются источниками поляризации ТЕД.