

А. П. Герасимов, А. В. Красавин, В. П. Ившин

МЕТОДИКА УЧЕТА ВЛАЖНОСТИ ПОВЕРОЧНОЙ СРЕДЫ ПРИ КАЛИБРОВКЕ КРИТИЧЕСКИХ СОПЕЛ НА ИСХОДНОЙ ЭТАЛОННОЙ УСТАНОВКЕ ГОСУДАРСТВЕННОГО ПЕРВИЧНОГО ЭТАЛОНА ГЭТ 118

Ключевые слова: влажность поверочной среды, метод учета, критическое сопло, калибровка, пропускная способность, поправочный множитель.

Предложена методика учета влажности поверочной среды при калибровке эталонных критических сопел на исходной эталонной установке государственного первичного эталона единиц объемного и массового расходов газа ГЭТ 118, позволяющая преобразовывать воспроизводимые величины массовых расходов при произвольных параметрах поверочной среды по давлению, температуре и относительной влажности в соответствующие значения объемных расходов при любых, в том числе принятых в качестве стандартных, условиях, а также осуществлять обратный переход от стандартных состояний к произвольным.

Key words: humidity of calibration environment, method for accounting, critical nozzle, calibration, flow capacity, correction multiplier.

A method for accounting humidity of calibration environment during calibration of critical nozzles at reference standard installation of state primary standard of volume and mass flow of gas GET 118, that allows to convert reproducible values of mass flow for arbitrary parameters of the medium pressure, temperature and relative humidity in the corresponding values volumetric flow rates in all, including those adopted as standard conditions, as well as to reverse transition from standard to arbitrary states, is proposed.

Принцип действия, состав и конструкция исходной эталонной установки (ИЭУ) государственного первичного эталона единиц объемного и массового расходов газа ГЭТ 118 достаточно подробно изложены в [1,2,3]. Вопросы применения критических сопел в составе критических расходомеров газа регламентированы Международным стандартом ISO 9300 [4], а в нашей стране – методическими указаниями МИ 1538-86 [5]. Процедура калибровки, оценка и анализ спектра неопределенностей измерений при калибровке критических сопел по объемному расходу на ИЭУ государственного первичного эталона подробно рассмотрены в [2,6].

Результатом выполнения цикла измерений на ИЭУ являются следующие величины, которые измерены во время калибровки критического сопла: $m^{(э)}$ – масса газа, кг, перепущенного в газосборный сосуд ИЭУ с постоянным расходом и накопленного в нем в течении измеряемого промежутка времени заполнения τ , с; P_B – атмосферное давление, Па; $t_{B,(T_B)}$ – температура воздуха, °C (K); ϕ_B – относительная влажность воздуха, безразмерная.

Полученная информация используется для определения массового расхода поверочной среды (атмосферного воздуха), протекающей через калибруемое критическое сопло

$$q_{m(P_B, T_B, \phi_B)}^{(э)} = m^{(э)} / \tau,$$

и расчета соответствующей величины объемного расхода $q_{v(P_B, T_B, \phi_B)}^{(э)}$ и пропускной способности калибруемого сопла по объемному расходу при стандартных условиях q_{vst}^* . Пометкой величин

верхним индексом (э) подчеркивается тот факт, что они измерены высокоточными средствами измерений из состава эталона.

Как правило, по завершении цикла измерений на ИЭУ ГЭТ 118, рассчитывают объемный расход воздуха при условиях измерений

$$q_{v(P_B, T_B, \phi_B)}^{(э)} = \frac{q_m^{(э)}}{\rho(P_B, T_B, \phi_B)},$$

где $q_m^{(э)}$ – массовый расход, воспроизведенный и измеренный на ИЭУ эталона; $\rho(P_B, T_B, \phi_B)$ – плотность влажного воздуха при давлении P_B , температуре T_B и относительной влажности ϕ_B .

Для нахождения плотности влажного воздуха ввиду отсутствия достаточно надежных и точных средств ее прямых измерений применяют косвенный метод, основанный на уравнении состояния

$$\rho(P_B, T_B, \phi_B) = P_B / \left[R_{(P_B, T_B, \phi_B)} \cdot T_B \right], \quad (1)$$

где $R_{(P_B, T_B, \phi_B)}$ – удельная газовая постоянная влажного воздуха.

В этом случае объемный расход воздуха через калибруемое критическое сопло $q_{v(P_B, T_B, \phi_B)}^*$, величина которого равна объемному расходу $q_{v(P_B, T_B, \phi_B)}^{(э)}$, воспроизведенному и измеренному ИЭУ государственного первичного эталона, выражают уравнением

$$q_{v(P_B, T_B, \varphi_B)}^* = q_{v(P_B, T_B, \varphi_B)}^{(\varepsilon)} = \mu f_* \left[\sqrt{\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}} \cdot k \cdot \sqrt{R}} \right]_{(P_B, T_B, \varphi_B)} \cdot \sqrt{T_B}, \quad (2)$$

где μ - коэффициент расхода критического сопла, безразмерный; f_* - площадь критического сечения сопла, m^2 ; $k_{(P_B, T_B, \varphi_B)}$ - показатель изэнтропы влажного воздуха, безразмерный. В формуле (2) подстрочный индекс около прямых скобок означает, что его следует приписывать к каждому заключенному в них параметру.

Если в (2) ввести обозначение

$$K_{(P_B, T_B, \varphi_B)}^* = \mu f_* \left[\sqrt{\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}} \cdot k \cdot \sqrt{R}} \right]_{(P_B, T_B, \varphi_B)}, \quad (3)$$

то оно упростится и примет вид

$$q_{v(P_B, T_B, \varphi_B)}^* = K_{(P_B, T_B, \varphi_B)}^* \cdot \sqrt{T_B}. \quad (4)$$

Поскольку $q_{v(P_B, T_B, \varphi_B)}^* = q_{v(P_B, T_B, \varphi_B)}^{(\varepsilon)}$, то с учетом этого получаем

$$K_{(P_B, T_B, \varphi_B)}^* = \frac{q_{v(P_B, T_B, \varphi_B)}^{(\varepsilon)}}{\sqrt{T_B}}. \quad (5)$$

Таким образом, объемный расход через конкретное эталонное критическое сопло при имеющем место сочетании параметров поверочной среды можно выразить формулой (4). Численное значение коэффициента $K_{(P_B, T_B, \varphi_B)}^*$ согласно (3) определено по результатам калибровки сопла на ИЭУ государственного первичного эталона ГЭТ 118 при случайно сформировавшемся на момент калибровки сочетании параметров рабочей среды (атмосферного воздуха) P_B, T_B, φ_B .

Для того, чтобы иметь возможность подвергнуть результаты измерений на ИЭУ, которые получены при различных значениях параметров атмосферы, совместной статистической обработке, можно допустить условно их стандартного сочетания, когда $P_B = P_{st} = 760$ мм.рт.ст. (101325 Па); $T_B = T_{st} = 293,15$ К (20 °C); $\varphi_B = \varphi_{st} = 0,6$. Этому сочетанию параметров соответствует объемный расход

$$q_{v(760; 293,15; 0,6)}^{(\varepsilon)} = q_{v(760; 293,15; 0,6)}^* = K_{(760; 293,15; 0,6)}^* \cdot \sqrt{293,15},$$

или упростив запись подстрочных индексов,

$$q_{vst}^{(\varepsilon)} = q_{vst}^* = K_{st}^* \cdot \sqrt{293,15}. \quad (6)$$

Из (5) и (6) следует

$$q_{vst}^* = q_{v(P_B, T_B, \varphi_B)}^* \cdot \frac{K_{st}^*}{K_{(P_B, T_B, \varphi_B)}^*} \cdot \sqrt{\frac{293,15}{T_B}}$$

или $q_{vst}^* = q_{v(P_B, T_B, \varphi_B)}^* \cdot \Psi_{(P_B, T_B, \varphi_B)} \cdot \sqrt{\frac{293,15}{T_B}},$

где поправочный множитель $\Psi_{(P_B, T_B, \varphi_B)}$ определяется как

$$\Psi_{(P_B, T_B, \varphi_B)} = \frac{\left[\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}} \cdot k \right]_{st}^{1/2} \cdot R_{st}^{1/2}}{\left[\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}} \cdot k \right]_{(P_B, T_B, \varphi_B)}^{1/2} \cdot R_{(P_B, T_B, \varphi_B)}^{1/2}} = \frac{C_{*st} \cdot R_{st}^{1/2}}{C_{*(P_B, T_B, \varphi_B)} \cdot R_{(P_B, T_B, \varphi_B)}^{1/2}}. \quad (7)$$

В выражении (7) для $\Psi_{(P_B, T_B, \varphi_B)}$ функция критического расхода влажного воздуха $C_{*(P_B, T_B, \varphi_B)}$ рассчитывается по текущим измеренным параметрам атмосферного воздуха P_B, T_B, φ_B , удельная газовая постоянная рабочей среды $R_{(P_B, T_B, \varphi_B)}$ - по значениям этих же параметров. Величины C_{*st} и R_{st} находятся при стандартных значениях $t_{st} = 20^\circ C$, $\varphi_{st} = 0,6$, $P_{st} = 760$ мм.рт.ст. (101325 Па). Произведение $C_{*st} \cdot R_{st}^{1/2}$ может быть определено один раз, и этим значением можно пользоваться при расчетах $C_{*st} \cdot R_{st}^{1/2} = 11,6311$ (Дж/кг·град)^{1/2}.

При использовании критических сопел в составе рабочих эталонов 1-го разряда (поверочных установок) по ГОСТ Р 8.618-2006 [7] следует осуществлять обратный переход от q_{vst}^* к

$q_{v(P_B, T_B, \varphi_B)}^*$ согласно формуле

$$q_{v(P_B, T_B, \varphi_B)}^* = q_{vst}^* \frac{1}{\Psi_{(P_B, T_B, \varphi_B)}} \cdot \sqrt{\frac{T_B}{293,15}}.$$

В вышеприведенную зависимость необходимо подставлять значения параметров рабочей среды P_B, T_B, φ_B , измеренных во время проведения калибровки (поверки) средств измерений на рабочем эталоне (поверочной установке).

При сохранении означенного подхода для вычисления величин объемного расхода $q_{v(P_B, T_B, \varphi_B)}^{(\varepsilon)}$ и пропускной способности калибруемого сопла на ИЭУ ГЭТ 118 по объемному расходу при стандартных условиях q_{vst}^* по

измеренному массовому расходу $q_{m(P_B, T_B, \varphi_B)}^{(э)}$

должен быть произведен расчет термодинамических параметров влажного воздуха, так как именно атмосферный воздух, влажность которого все же изменяется в достаточно широких пределах, является рабочей средой исходной эталонной установки государственного эталона.

Удельную газовую постоянную влажного воздуха рассчитывают по формуле [8]

$$R_{(t_B, \varphi_B)} = \frac{287,1}{1 - 3,728 \cdot 10^{-6} \varphi_B \cdot P_s}, \text{ Дж/(кг·град)} \quad (8)$$

где P_s - давление насыщенного водяного пара во влажном воздухе, Па; φ_B - относительная влажность воздуха в долях единицы.

Наглядное представление об изменении давления насыщенного водяного при атмосферном давлении в зависимости от температуры дают данные, приведенные в таблице 1.

Таблица 1 – Зависимость давления насыщенного водяного пара P_s от температуры t_B

$t_B, ^\circ\text{C}$	10	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	30	35
$P_s, \text{Па}$	1227,1	1704,1	1816,9	1936,3	2062,3	2195,7	2336,9	2485,0	2641,9	2807,7	2982,2	3166,6	4241,8	5621,8

Результаты расчета $R_{(t_B, \varphi_B)}$ согласно (8)

представлены в таблице 2. Атмосферное давление принято равным своему стандартному значению $P_B=101325 \text{ Па}$.

Таблица 2 – Газовая постоянная влажного воздуха $R_{(t_B, \varphi_B)}$ [Дж/(кг·град)] при температуре t_B и влажности φ_B

$\varphi_B \backslash t_B, ^\circ\text{C}$	10	15	16	18	20	22	24	30	35
0	287,1	287,1	287,1	287,1	287,1	287,1	287,1	287,1	287,1
0,30	287,49	287,65	287,68	287,76	287,85	287,95	288,06	288,47	288,92
0,40	287,63	287,83	287,88	287,99	288,10	288,24	288,38	288,93	289,50
0,50	287,76	288,01	288,08	288,21	288,36	288,52	288,71	289,39	290,14
0,60	287,89	288,20	288,27	288,43	288,61	288,81	289,03	289,85	290,76
0,70	288,02	288,38	288,47	288,65	288,86	289,09	289,35	290,31	291,37
0,80	288,15	288,57	288,66	288,88	289,12	289,38	289,68	290,78	292,00

Плотность влажного воздуха рассчитывают по уравнению (1), куда значения температуры T_B подставляют в градусах Кельвина $T_B=t_B+293,15$.

Влагосодержание d , массовые доли пара g_n и сухого воздуха $g_{св}$ в смеси (во влажном воздухе), ее теплоемкость $C_{v(t_B, \varphi_B)}$, необходимые для расчета показателя изэнтропии влажного воздуха, находят согласно известным зависимостям [9,10]

$$d=0,622 \frac{P_s \varphi_B}{P_B - \varphi_B P_s};$$

$$g_n = \frac{d}{1+d}; \quad g_{св} = \frac{1}{1+d}; \quad (9)$$

$$C_{v(t_B, \varphi_B)} = g_{св} C_{vсв} + g_n C_{vн},$$

где теплоемкости сухого воздуха и пара соответственно равны $C_{vсв} = 716,4 \text{ Дж/(кг·град)}$;

$$C_{vн} = 1398 \text{ Дж/(кг·град)}.$$

Тогда показатель изэнтропии влажного воздуха в зависимости от его температуры и относительной влажности может быть рассчитан по формуле

$$k_{(t_B, \varphi_B)} = \frac{C_{p(t_B, \varphi_B)}}{C_{v(t_B, \varphi_B)}} = 1 + \frac{R_{(t_B, \varphi_B)}}{C_{v(t_B, \varphi_B)}}. \quad (10)$$

Результаты расчетов показателя изэнтропии влажного воздуха по уравнениям (8÷10) приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Зависимость показателя изэнтропии $k_{(t_B, \varphi_B)}$ влажного воздуха от температуры t_B и относительной влажности φ_B

$\varphi_B \backslash t_B, ^\circ\text{C}$	10	15	16	18	20	22	24	30	35
0	1,400	1,400	1,400	1,400	1,400	1,400	1,400	1,400	1,400
0,30	1,4004	1,4003	1,4003	1,4002	1,4002	1,4000	1,4000	1,3997	1,3993
0,40	1,4003	1,4002	1,4001	1,4001	1,4000	1,3999	1,3997	1,3993	1,3987
0,50	1,4002	1,4001	1,4000	1,4000	1,3999	1,3996	1,3995	1,3990	1,3984
0,60	1,4001	1,3999	1,3998	1,3997	1,3996	1,3994	1,3992	1,3986	1,3979
0,70	1,3999	1,3997	1,3997	1,3995	1,3994	1,3992	1,3990	1,3983	1,3972
0,80	1,3996	1,3995	1,3995	1,3994	1,3992	1,3990	1,3988	1,3979	1,3970

Данные расчетов поправочного множителя $\Psi_{(P_B, T_B, \varphi_B)}$ по уравнению (7) при атмосферном давлении представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Поправочный множитель $\Psi_{(P_B, T_B, \varphi_B)}$

$\varphi_B \backslash t_B, ^\circ\text{C}$	10	15	16	18	20	22	24	30	35
0	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
0,30	1,00180	1,00151	1,00141	1,00134	1,00124	1,00105	1,00089	1,00025	0,99957
0,40	1,00151	1,00122	1,00113	1,00096	1,00086	1,00057	1,00039	0,99954	0,99873
0,50	1,00132	1,00094	1,00084	1,00067	1,00038	1,00020	0,99988	0,99880	0,99514
0,60	1,00113	1,00064	1,00055	1,00029	1,00000	0,99974	0,99940	0,99818	0,99674
0,70	1,00094	1,00036	1,00027	1,00000	0,99971	0,99929	0,99890	0,99723	0,99588
0,80	1,00074	1,00007	0,99998	0,99962	0,99924	0,99885	0,99837	0,99671	0,99489

Расчет термодинамических параметров влажного воздуха: удельной газовой постоянной

$R_{(P_B, T_B, \varphi_B)}$, его теплоемкостей при постоянном давлении $C_{p(P_B, T_B, \varphi_B)}$ и постоянном объеме

$C_{v(P_B, T_B, \phi_B)}$, показателя изэнтропы $k_{(P_B, T_B, \phi_B)}$ - основан на соотношениях модели одномерного энергоизолированного течения идеального газа. С 2009 г. приведенная методика учета влажности рабочей среды при калибровке критических сопел на ИЭУ государственного первичного эталона введена в программу обработки результатов измерений его измерительно-вычислительного комплекса. Найденные термодинамические параметры влажного атмосферного воздуха, являющегося рабочей средой при калибровке сопел, позволяют преобразовывать экспериментально определенные на ИЭУ значения массового расхода в соответствующие величины объемного расхода при конкретном сочетании параметров P_B, T_B, ϕ_B , имевших место при воспроизведении единицы, и пропускной способности критического сопла по объемному расходу при стандартных условиях.

Метрологические характеристики эталона ГЭТ 118 в значительной степени зависят от неизменности пропускных способностей эталонных критических сопел, входящих в состав эталона. Согласно программе обеспечения единства измерений калибровка эталонных критических сопел после переутверждения ГЭТ 118 в 2006 г. производится с регулярной периодичностью один раз в квартал и даже чаще.

В протоколах калибровки эталонных критических сопел приведены результаты измерений параметров состояния атмосферы: относительной влажности ϕ_B , атмосферного давления P_B и температуры окружающей среды t_B , а также результаты взвешивания перепускаемой с постоянным расходом через калибруемое критическое сопло рабочей среды и времени заполнения газосборного сосуда ИЭУ. Кроме того, там же помещены результаты расчетов массового расхода, плотности влажного воздуха и приведенного к стандартным условиям объемного расхода q_{vst}^* . В каждом протоколе дана информация по результатам 11 независимых измерений, рассчитаны средние значения приведенного к стандартным условиям расхода q_{vst} , стандартные неопределенности по типу А, по типу В, стандартные суммарная U_C и расширенная U_R неопределенности. Причем величины U_A, U_B, U_C, U_R выражены как в единицах измеряемой физической величины, так и в процентах.

Анализ результатов экспериментального определения пропускной способности по объемному расходу при стандартных условиях наиболее исследованного критического сопла СКЭ-2 на протяжении последних 4-х лет показывает, что среднее значение q_{vst}^* составляет 19,9172 м³/ч. При этом в боксе эталона, находящегося в помещении государственного метрологического комплекса расходомерных станций, относительная влажность атмосферного воздуха изменялась от 28,2% до

62,8%. Разница между максимальной и минимальной пропускными способностями сопла СКЭ-2 в течение рассматриваемого года, отнесенная к среднему значению за год и выраженная в процентах, не превышает $(0,04 \pm 0,08)\%$. Если же взять разницу между средними по году максимальным и минимальным значениями пропускной способности по объемному расходу при стандартных условиях для сопла СКЭ-2, имевших место в 2010÷2013 годах и отнести ее к среднему за 4 года значению, то получим отклонение 0,026%.

Результаты калибровки входящих в состав эталона ГЭТ 118 эталонных критических сопел 10-Э, 16-Э, 20-Э, 40-Э, 50-Э, 60-Э, 100-Э, полученные в 2009-2012 гг. также показывают, что относительное отклонение в пропускных способностях для названных критических сопел для смежных годов не превышает 0,03%. Число в обозначении эталонного критического сопла показывает номинальный объемный расход через сопло в м³/ч при его применении по назначению.

Калибровка критических сопел на ИЭУ ГЭТ 118 обеспечивает в настоящее время наиболее достоверные результаты, но является чрезвычайно трудоемкой. Отклонения в пропускных способностях эталонных критических сопел по объемному расходу при стандартных условиях, полученных в разное время и в различные времена года при различных значениях параметров окружающей среды P_B, T_B, ϕ_B , незначительны и по своей величине практически не превышают точностных возможностей применяемого при исследованиях инструмента [6].

Предлагаемая методика учета влажности рабочей среды, а также использование пропускной способности сопла по объемному расходу при стандартных условиях q_{vst}^* позволяют осуществлять преобразование измеренных значений массового расхода при калибровке на ИЭУ ГЭТ 118 эталонного критического сопла в соответствующие величины объемного расхода при условиях измерений и при условиях, принятых в качестве стандартных, и производить обратный переход от стандартных условий к произвольным на любой ступени воспроизведения и передачи размера единицы расхода газа.

Литература

1. А.П. Герасимов, В.П. Иванов, В.М. Красавин, С.В. Раинчик, О.К. Семенова, Государственный первичный эталон единиц объемного и массового расходов газа, *Мир измерений*, 7, С. 10-11 (2006).
2. В.М. Красавин, С.В. Раинчик, В.П. Ившин, А.В. Красавин, И.А. Быков, С.С. Лобарев, Исходная эталонная установка государственного первичного эталона единиц объемного и массового расходов газа ГЭТ 118-2006. Процедура калибровки критических сопел, *Вестник Казанского технологического университета*, Т.16 № 10, С. 285-288 (2013).
3. А.П. Герасимов, А.В. Красавин, Калибровка критических сопел на эталонах расхода газа, *Измерительная техника*, 10, С. 36-39 (2013).

4. ISO 9300:2005 (E). Measurement of gas flow by means of critical flow Venturi nozzles.
5. МИ 1538-86. ГСИ. Критические расходомеры. Методика выполнения измерений массового расхода газа.
6. В.М. Красавин, С.В. Раинчик, В.П. Ившин, А.В. Красавин, Оценивание неопределенностей измерений при проведении калибровки критических сопел на исходной эталонной установке ГЭТ 118-2006, *Вестник Казанского технологического университета*, Т.16 №13, С. 193-197 (2013).
7. ГОСТ Р 8.618-2006. ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений объемного и массового расходов газа, Издательство стандартов, Москва, 2006.
8. В.В. Мурзаков, *Основы технической термодинамики*, Энергия, Москва, 1973. 304 с.
9. А.В. Болгарский, Г.А. Мухачев, В.К. Щукин, *Термодинамика и теплопередача*, Высшая школа, Москва, 1975. 495 с.

© **А. П. Герасимов** – канд. техн. наук, вед. науч. сотр. НИО-16 ФГУП «ВНИИР»; **А. В. Красавин** – асп. каф. САиУТП КНИТУ, науч. сотр. НИО-13 ФГУП «ВНИИР», kras.84@mail.ru; **В. П. Ившин** – канд. техн. наук, доц. той же кафедры, ivshin2007@yandex.ru.