

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: - масса газа, кг, перепущенного в газосборный сосуд ИЭУ с постоянным расходом и накопленного в нем в течении измеряемого промежутка времени заполнения, с; - атмосферное давление, Па; - температура воздуха, °С (К); - относительная влажность воздуха, безразмерная. Полученная информация используется для определения массового расхода поверочной среды (атмосферного воздуха), протекшей через калибруемое критическое сопло, и расчета соответствующей величины объемного расхода и пропускной способности калибруемого сопла по объемному расходу при стандартных условиях. Пометкой величин верхним индексом (ε) 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, где \dot{m} - массовый расход, воспроизведенный и измеренный на ИЭУ эталона; ρ - плотность влажного воздуха при давлении, температуре и относительной влажности. Для нахождения плотности влажного воздуха ввиду отсутствия достаточно надежных и точных средств ее прямых измерений применяют косвенный метод, основанный на уравнении состояния, (1) где ρ_0 - удельная газовая постоянная влажного воздуха. В этом случае объемный расход воздуха через калибруемое критическое сопло, величина которого равна объемному расходу, воспроизведенному и измеренному ИЭУ государственного первичного эталона, выражают уравнением, (2) где C_d - коэффициент расхода критического сопла, безразмерный; A^* - площадь критического сечения сопла, м²; γ - показатель изоэнтропы 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, (3) то оно упростится и примет вид (4) Поскольку, то с учетом этого получаем. (5) Таким образом, объемный расход через конкретное эталонное критическое сопло при имеющем место сочетании параметров поверочной среды можно выразить формулой (4). Численное значение коэффициента 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) . 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 $p = 760$ мм.рт.ст. (101325 Па); $T = 293,15$ К (20 °C); $\phi = 0,6$. Этому сочетанию параметров соответствует объемный расход V , или упростив запись подстрочных индексов, (6) Из (5) и (6) следует или $V = \frac{W}{\rho}$, где поправочный множитель определяется как (7) В выражении (7) для функция критического расхода влажного воздуха рассчитывается по текущим измеренным параметрам атмосферного воздуха p, T, ϕ , удельная газовая постоянная рабочей среды - по значениям этих же параметров. Величины V и W находятся при стандартных значениях $T = 20^\circ\text{C}$, $\phi = 0,6$, $p = 760$ мм.рт.ст (101325 Па). Произведение может быть определено один раз, и этим значением можно пользоваться при расчетах $W = 11,6311$ (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 V к W согласно формуле . В вышеприведенную зависимость необходимо подставлять значения параметров рабочей среды p, T, ϕ , измеренных во время проведения калибровки (поверки) средств измерений на рабочем эталоне (поверочной установке). При сохранении означенного подхода для вычисления величин объемного расхода и пропускной способности калибруемого сопла на ИЭУ ГЭТ 118 по объемному расходу при стандартных условиях по измеренному массовому расходу 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] $W = \frac{p}{\rho} \cdot \phi$ (8) где p - давление насыщенного водяного пара во влажном воздухе, Па; ϕ - 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 тв, °C

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

Результаты расчета согласно (8) представлены в таблице 2. Атмосферное давление принято равным своему стандартному значению $P_B = 101325$ Па. Таблица 2 - Газовая постоянная влажного воздуха [Дж/(кг·град)] при температуре t_B и влажности ϕ_B тв, °C

t_B , °C	ϕ_B	Газовая постоянная
10	0,30	287,1
15	0,30	287,1
16	0,30	287,1
17	0,30	287,1
18	0,30	287,1
20	0,30	287,1
22	0,30	287,1
24	0,30	287,1
30	0,30	287,1
35	0,30	287,1
10	0,40	287,49
15	0,40	287,65
16	0,40	287,68
17	0,40	287,76
18	0,40	287,85
20	0,40	287,95
22	0,40	288,06
24	0,40	288,47
30	0,40	288,92
35	0,40	289,50
10	0,50	287,76
15	0,50	288,01
16	0,50	288,08
17	0,50	288,21
18	0,50	288,36
20	0,50	288,52
22	0,50	288,71
24	0,50	289,39
30	0,50	290,14
35	0,50	290,76
10	0,60	287,89
15	0,60	288,20
16	0,60	288,27
17	0,60	288,43
18	0,60	288,61
20	0,60	288,81
22	0,60	289,03
24	0,60	289,85
30	0,60	290,76
35	0,60	290,76

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 ТВ подставляют в градусах Кельвина
 $TB = tB + 293,15$. Влагосодержание d, массовые доли пара gp и сухого воздуха gсв
в смеси (во влажном воздухе), ее теплоемкость , необходимые для расчета
показателя изоэнтропы влажного воздуха, находят согласно известным
зависимостям [9,10] ; ; (9) , где теплоемкости сухого воздуха и пара
соответственно равны Дж/(кг·град); Дж/(кг·град). Тогда показатель изоэнтропы
влажного воздуха в зависимости от его температуры и относительной
влажности может быть рассчитан по формуле (10) Результаты расчетов
показателя изоэнтропы влажного воздуха по уравнениям (8÷10) приведены в
таблице 3. Таблица 3 - Зависимость показателя изоэнтропы влажного воздуха от
температуры tВ и относительной влажности φВ

tВ, °С	φВ 10	φВ 15	φВ 16	φВ 18	φВ 20	φВ 22	φВ 24	φВ 30
35 0	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
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
1,3994	1,3992	1,3986	1,3979	0,70	1,3999	1,3997	1,3997	1,3995
1,3994	1,3992	1,3986	1,3979	0,70	1,3999	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 по уравнению (7) при атмосферном давлении представлены в таблице 4.			

Таблица 4 - Поправочный множитель

tВ, °С	φВ 10	φВ 15	φВ 16	φВ 18	φВ 20	φВ 22	φВ 24	φВ 30
35 0	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	0,60	1,00113	1,00064	1,00055	1,00029	1,00000	0,99974	0,99940
0,99818	0,70	1,00094	1,00036	1,00027	100000	0,99971	0,99929	0,99890
0,99723	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 , его теплоемкостей при постоянном давлении и постоянном объеме , показателя изоэнтропы - 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 , 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, атмосферного давления и температуры окружающей среды, 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. В каждом протоколе дана информация по результатам 11 независимых измерений, рассчитаны средние значения приведенного к стандартным условиям расхода, стандартные неопределенности по типу А, по типу В, стандартные суммарная UC и расширенная UP неопределенности. Причем величины UA, UB, UC, UP 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 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÷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, 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 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.