

Государственный первичный эталон единиц объемного и массового расходов газа ГЭТ 118-2006 занимает центральное место среди технических средств, необходимых для достижения единства и требуемой точности измерений расхода и количества газа. Принцип действия, конструкция, состав исходной эталонной установки (ИЭУ) ГЭТ 118-2006, на которой осуществляется калибровка эталонных критических сопел, достаточно подробно освещены в [1,2]. Уравнение измерений для пропускной способности сопла по объемному расходу, приведенному к стандартным условиям, при его калибровке на ИЭУ: где- масса воздуха, заполнившего газосборный сосуд (ГСС); - время заполнения ГСС, с; - плотность сухого воздуха при стандартных значениях атмосферного давления и температуры, кг/м<sup>3</sup>; и атмосферное давление и температура воздуха в помещении ИЭУ, Па и К; , - давление и плотность насыщенного водяного пара, Па, кг/м<sup>3</sup>; - поправочный множитель по объемному расходу, учитывающий влажность воздуха. Необходимо отметить, что в знаменателе дроби перед квадратным корнем уравнения (1) записано выражение для плотности влажного атмосферного воздуха при . Стандартную неопределенность по типу А нахождения пропускной способности сопла по объемному расходу при стандартных условиях, обусловленную источниками неопределенности, имеющими случайный характер, определяют по формулам: где при этом - i-й результат расчета пропускной способности калибруемого на ИЭУ критического сопла по объемному расходу, приведенному к стандартным условиям, м<sup>3</sup>/ч. Стандартная неопределенность, оцениваемая по типу В, определяется структурой уравнения измерений и неопределенностями измерений параметров в уравнении измерений. Стандартная неопределенность по типу В рассчитывается единожды и уточняется при замене средств измерений, входящих в состав ИЭУ эталона, на более точные, а также при уточнении уравнения измерений. Она может быть найдена на основе линейной теории точности по известным правилам [3]. Исходное уравнение (1) можно рассматривать как уравнение структурной схемы измерительной цепи. Неопределенность структурной схемы зависит от неопределенностей, возникающих в отдельных измерительных звеньях цепи под влиянием различных внутренних и внешних дестабилизирующих факторов. Логарифм уравнения измерения (1) имеет вид: Полный дифференциал от уравнения (3) После преобразования и упрощения последнего слагаемого в (4) получим С учетом того, что , стандартная неопределенность , оцениваемая по типу В, может быть определена где коэффициенты влияния (чувствительности) выражаются следующим образом Используя зависимость давления и плотности насыщенного водяного пара от температуры, а также изменение плотности воздуха при давлении 760 мм. рт. ст. от температуры и относительной влажности и принимая во внимание, что при калибровке критических сопел на ИЭУ ГЭТ 118-2006 температура воздуха в помещении изменяется в достаточно

узком диапазоне ( $20 \pm 1$ ) °C, можно рассчитать численные значения коэффициентов влияния. Ниже приведены их средние значения, которые будут использованы при анализе составляющих стандартной неопределенности, оцениваемых по типу В Составляющими неопределенности весоизмерительного узла ИЭУ по типу В являются неопределенность используемых весов «Mettler Toledo» PB 1502-S/A, неопределенность обусловленная ценой деления шкалы весов в составе весоизмерительного узла, неопределенность из-за отклонения результата взвешивания эталонной гири, помещенной на подвижную часть весоизмерительного узла. Максимальная неопределенность калибровки весов согласно сертификату калибровки составляет мг на отметке шкалы весов 1,2 кг при доверительной вероятности 0,95 и коэффициенте охвата 2 Цена деления шкалы весов R составляет 0,01 г. Принимая, что стандартная неопределенность по типу В оценивается половиной цены деления весов при полезной нагрузке 0,8 кг, то неопределенность, обусловленная ценой деления шкалы весов, будет равна Стандартная неопределенность, оцениваемая по типу В и обусловленная отклонением показаний весов в составе весоизмерительного узла ИЭУ от массы взвешиваемой гири может быть определена как Применяя правила геометрического суммирования, можно рассчитать неопределенность по типу В взвешивания заполненного ГСС Показание весов при взвешивании «пустого» ГСС равно приблизительно 0,2 кг, то есть весы предварительно нагружены, чтобы убрать люфты и зазоры в элементах подвески к весам подвижной части весоизмерительного узла. Поэтому аналогично может быть рассчитана неопределенность, оцениваемая по типу В, взвешивания «пустого» ГСС На результат взвешивания массы газа, перепущенного в ГСС, влияние оказывают параметры атмосферы: температура окружающего воздуха, барометрическое давление и относительная влажность. Их изменение в процессе взвешивания как откакумированного, так и заполненного ГСС приводит к изменению плотности воздуха и действующей со стороны атмосферы выталкивающей архимедовой силы на ГСС и другие находящиеся в воздухе элементы подвижной части весоизмерительного узла. Это естественно вызывает изменение показаний весов и увеличивает неопределенность взвешивания. Однако, при взвешивании можно создать такие условия, которые оговорены в Правилах содержания и применения эталона, когда влияние вышеназванных дестабилизирующих факторов можно свести к минимуму. Неопределенность, оцениваемая по типу В, возникающая в результате измерения времени заполнения ГСС, обусловлена неопределенностью калибровки используемого счетчика, шагом таймера и погрешностью определения моментов начала и завершения времени заполнения ГСС. Время заполнения составляет от 29 с (большой расход) до 1440 с (малый расход) в зависимости от пропускной способности калибруемого сопла. Время измерять мы умеем достаточно хорошо, поэтому неопределенностью калибровки счетчика ввиду ее малости можно

пренебречь. Как показал анализ большого количества временных диаграмм начала и окончания процесса заполнения ГСС, полученных при помощи малоинерционных термоанемометрических датчиков на разных расходах, разница между измеренным таймером времени и временем заполнения ГСС не превышает 0,01 с. Тогда неопределенность в отсчете времени заполнения составит: на малом расходе – 0,0004%; на большом расходе – 0,02%.

Неопределенность, обусловленная шагом таймера, рассчитывается просто, и для времени заполнения 1440 с и 29 с соответственно, составляет: . Окончательно неопределенность измерения времени заполнения ГСС, оцениваемая по типу В, на малом расходе составит 0,0004%, на большом расходе – 0,02%, то есть неопределенностью, обусловленной шагом таймера, также можно пренебречь.

Неопределенность измерения температуры атмосферного воздуха, который является рабочей средой при калибровке критических сопел на ИЭУ, характеризуется неопределенностью калибровки используемого средства измерений температуры. При этом следует учитывать, что значения температуры в градусах Цельсия и Кельвина связаны соотношением

Неопределенность измерения барометрического давления по типу В определяется неопределенностью калибровки цифрового прецизионного барометра. За рабочее давление примем барометрическое давление 760 мм. рт. ст. (101325 Па), тогда будем иметь Неопределенность измерения относительной влажности атмосферного воздуха, оцениваемую по типу В, определяется неопределенностью калибровки измерительного преобразователя влажности

При табличной форме задания неопределенность поправочного коэффициента по объемному расходу влажного воздуха может быть найдена как отношение пяти единиц последнего разряда его численного значения к самой величине

Аналогично могут быть определены неопределенности, оцениваемые по типу В, давления и плотности насыщенного водяного пара

Бюджет неопределенностей, оцениваемых по типу В, при экспериментальном определении массового расхода на ИЭУ ГЭТ 118-2006 в процессе калибровки эталонных критических сопел приведен в таблице 1. Диапазон измерений ИЭУ условно разбит на области малых (от 2 до 20 м<sup>3</sup>/ч) и больших (от 20 до 100 м<sup>3</sup>/ч) расходов. Следует отметить, что как на малых, так и на больших расходах вес собранного в ГСС воздуха примерно составлял 800 г. Исходя из этих соображений, определялось расчетное время заполнения ГСС.

Таблица 1 – Бюджет неопределенностей, оцениваемых по типу В, при экспериментальном определении массового расхода

Обозначение	Источник неопределенности	Оценка неопределенности
Взвешивание заполненного воздухом ГСС		0,009%
Взвешивание «пустого» ГСС		0,035%
Измерение времени заполнения малый расход		0,0004%
большой расход		0,02%
Измерение массового расхода малый расход		0,014%
большой расход		0,022%

В таблице 2 приведен бюджет неопределенностей, оцениваемых по типу В, при калибровке критических сопел по объемному расходу, приведенному к

стандартным условиям, см. уравнение (5). Суммарную стандартную неопределенность определения пропускной способности калибруемого критического сопла по объемному расходу, приведенному к стандартным условиям, вычисляют с учетом зависимостей (2) и (5). (6) Расширенную стандартную неопределенность рассчитывают по формуле (7) где коэффициент охвата  $k=2$  при доверительной вероятности  $P=0,95$ . Таблица 2 – Бюджет неопределенностей, оцениваемых по типу В, при калибровке критических сопел по объемному расходу

Обозначение	Источник неопределенности	Оценка неопределенности
Массовый расход	малый расход	0,014%
	большой расход	0,022%
Температура атмосферного воздуха перед соплом		0,01%
Барометрическое давление (давление перед соплом)		0,0043%
Поправочный коэффициент по объемному расходу влажного воздуха		0,005%
Давление насыщенного водяного пара		0,02%
Плотность насыщенного водяного пара		0,29%
Относительная влажность атмосферного воздуха		1,0%
Стандартная неопределенность пропускной способности сопла по объемному расходу воздуха при стандартных условиях	малый расход	0,017%
	большой расход	0,024%

Рассмотрение отдельных статей приведенных бюджетов неопределенностей позволяет сделать ряд выводов и дать несколько рекомендаций, направленных на повышение точности проводимых на ИЭУ ГЭТ 118-2006 измерений:

1. При калибровке критических сопел с малыми пропускными способностями необходимо придавать подвижной части весоизмерительного узла большую отрицательную плавучесть, то есть увеличивать предварительную нагрузку весов.
2. Относительно измерений времени заполнения ГСС  $\tau$  следует иметь в виду, что погрешность, с которой оно может быть измерено современными средствами измерений, мала по сравнению с погрешностью, причина которой обусловлена тем, насколько правильно выбраны моменты для начала и окончания его отсчета.
3. С учетом изложенного в п. 2 необходимо оснастить ИЭУ быстродействующим переключателем потока или так выбрать моменты начала и окончания отсчета времени заполнения ГСС, чтобы, поделив массу перепущенного в ГСС воздуха  $m$  на это время  $\tau$ , получить постоянный расход, соответствующий пропускной способности калибруемого критического сопла.
4. Анализ численных значений произведений коэффициентов влияния на неопределенности измеряемых параметров, оцениваемых по типу В, в формуле (5) требует повышенного внимания к точности проводимых измерений времени на больших расходах и параметров атмосферы: температуры окружающего воздуха, относительной влажности и барометрического давления.
5. Выполнение калибровочных работ в промежутки времени, которые характеризуются большими скоростями изменений атмосферного давления, температуры, влажности, высокой ветровой нагрузкой, вибрацией, колебаниями почвы, высоким уровнем напряженности электромагнитных полей, запрещается.

Применение ИЭУ для калибровки эталонных критических сопел, входящих в

состав рабочих эталонов 1-го разряда и рабочих критических расходомеров [4], с целью передачи размера единицы последним от государственного первичного эталона ГЭТ 118-2006 возможно при строгом соблюдении Правил содержания и применения эталона. Откалиброванные на ИЭУ эталонные критические сопла используются в составе других эталонных установок ГЭТ 118-2006, рабочих эталонов 1-го разряда (поверочных установок), рабочих критических расходомеров, в составе компараторов при сличениях ГЭТ 118-2006 с национальными эталонами других стран, а так же при аттестации и утверждении эталонов единиц величин [4].