

УДК 681.121

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

Ключевые слова: эталон, критическое сопло, калибровка, измерение, оценивание неопределенностей.

Путем логарифмического дифференцирования уравнения измерений для пропускной способности критического сопла по объемному расходу q_{vst} , приведенному к стандартным условиям, при его калибровке на исходной эталонной установке ГЭТ 118-2006 получена зависимость, позволяющая осуществить оценку неопределенностей по типу B, возникающих при измерении всех аргументов q_{vst} с учетом их индивидуальных коэффициентов влияния на конечный результат. Анализ отдельных статей полученного бюджета неопределенностей позволяет наметить ряд мероприятий, направленных на повышение точности выполняемых на исходной эталонной установке калибровочных работ. Привлечение же необходимого объема статистического материала и нахождение стандартной неопределенности по типу A, обусловленную источниками неопределенности, имеющими случайный характер, делает возможным произвести оценку всего спектра неопределенностей исходной эталонной установки ГЭТ 118-2006.

Key words: standard, critical nozzle, calibration, measurement, evaluation of measurement.

By logarithmic differentiation of the measurement equation for the capacity of volumetric flow rate of the critical nozzle q_{vst} , reduced to the standard conditions, when it is on the primary calibration standard installation GET 118-2006, the dependence is obtained, permitting to evaluate the type B uncertainties, appearing in the measurement of all arguments of q_{vst} , according to their individual influence coefficients to final result. Analysis of individual items of obtained budget of uncertainties allows to outline a series of activities aimed at improving the accuracy of calibration works running on the primary standard installation. Involvement of the same required amount of statistical material and finding the standard type A uncertainty, caused by the sources of uncertainty that have random character, making it possible to evaluate the full range of uncertainties of the primary standard installation GET 118-2006.

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:

$$q_{vst} = \frac{m^{(э)}/\tau}{2,893 \cdot 10^{-3} \rho_{(P_{st}, T_{st}, \varphi=0)} \cdot \frac{P_B - \varphi P_{B,п.маx}}{T_B} + \varphi \rho_{B,п.маx}} \cdot \sqrt{\frac{T_{st}}{T_B}} \cdot k_{qv} \quad (1)$$

где $m^{(э)}$ – масса воздуха, заполнившего газосборный сосуд (ГСС); τ – время заполнения ГСС, с; $\rho_{(P_{st}, T_{st}, \varphi=0)}$ – плотность сухого воздуха при стандартных значениях атмосферного давления P_{st} и

температуры T_{st} , кг/м³; P_B и T_B – атмосферное давление и температура воздуха в помещении ИЭУ, Па и К; $\rho_{B,п.маx}$, $\rho_{B,п.маx}$ – давление и плотность насыщенного водяного пара, Па, кг/м³; k_{qv} – 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 P_B , T_B , φ_B .

Стандартную неопределенность по типу A нахождения пропускной способности сопла по объемному расходу при стандартных условиях, обусловленную источниками неопределенности, имеющими случайный характер, определяют по формулам:

$$U_A(q_{vst}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (q_{vsti} - \bar{q}_{vst})^2}{n(n-1)}}; \quad (2)$$

где $\bar{q}_{vst} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n q_{vsti}$;

при этом $Q_{v_{\text{ст}}}$ - i -й результат расчета пропускной способности калибруемого на ИЭУ критического сопла по объемному расходу, приведенному к стандартным условиям, $\text{м}^3/\text{ч}$.

Стандартная неопределенность, оцениваемая по типу В, определяется структурой уравнения измерений и неопределенностями измерений параметров в уравнении измерений.

Стандартная неопределенность по типу В $U_B(Q_{v_{\text{ст}}})$ 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:

$$\begin{aligned} \lg q_{v_{\text{ст}}} &= \lg m^{(3)} - \lg \tau - \\ & - \lg \left[2,893 \cdot 10^{-3} \rho(P_{\text{ст}}, T_{\text{ст}}, \varphi=0) \cdot \frac{P_B - \varphi P_{B, \text{п. макс}} + \varphi \rho_{B, \text{п. макс}}}{T_B} \right] + \\ & + \frac{1}{2} \lg T_{\text{ст}} - \frac{1}{2} \lg T_B + \lg k_{qV}. \quad (3) \end{aligned}$$

Полный дифференциал от уравнения (3)

$$\begin{aligned} \frac{dq_{v_{\text{ст}}}}{q_{v_{\text{ст}}}} &= \frac{dm^{(3)}}{m^{(3)}} - \frac{d\tau}{\tau} - \frac{1}{2} \frac{dT_B}{T_B} + \frac{dk_{qV}}{k_{qV}} - \\ & - \frac{d \left[2,893 \cdot 10^{-3} \rho(P_{\text{ст}}, T_{\text{ст}}, \varphi=0) \cdot \frac{P_B - \varphi P_{B, \text{п. макс}} + \varphi \rho_{B, \text{п. макс}}}{T_B} \right]}{2,893 \cdot 10^{-3} \rho(P_{\text{ст}}, T_{\text{ст}}, \varphi=0) \cdot \frac{P_B - \varphi P_{B, \text{п. макс}} + \varphi \rho_{B, \text{п. макс}}}{T_B}}. \quad (4) \end{aligned}$$

После преобразования и упрощения последнего слагаемого в (4) получим

$$\begin{aligned} \frac{dq_{v_{\text{ст}}}}{q_{v_{\text{ст}}}} &= \frac{dm^{(3)}}{m^{(3)}} - \frac{d\tau}{\tau} - \frac{1}{2} \frac{dT_B}{T_B} + \frac{dk_{qV}}{k_{qV}} - \frac{P_B}{P_B - \varphi P_{B, \text{п. макс}}} \cdot \frac{dP_B}{P_B} + \\ & + \left[\varphi \frac{P_{B, \text{п. макс}}}{P_B - \varphi P_{B, \text{п. макс}}} - \varphi \frac{\rho_{B, \text{п. макс}}}{\rho(P_B, T_B, \varphi_B)} \right] \frac{d\varphi}{\varphi} + \frac{\varphi P_{B, \text{п. макс}}}{P_B - \varphi P_{B, \text{п. макс}}} \cdot \\ & \cdot \frac{dP_{B, \text{п. макс}}}{P_{B, \text{п. макс}}} - \varphi \frac{\rho_{B, \text{п. макс}}}{\rho(P_B, T_B, \varphi_B)} \cdot \frac{d\rho_{B, \text{п. макс}}}{\rho_{B, \text{п. макс}}}. \end{aligned}$$

С учетом того, что $m^{(3)} = m_2 - m_1$, стандартная неопределенность $q_{v_{\text{ст}}}$, оцениваемая по типу В, может быть определена

$$\frac{U_B(Q_{v_{\text{ст}}})}{Q_{v_{\text{ст}}}} = \left\{ \begin{aligned} & \left[\psi(m_2) \frac{U_B(m_2)}{m_2} \right]^2 + \left[\psi(m_1) \frac{U_B(m_1)}{m_1} \right]^2 + \\ & \left[\psi(\tau) \frac{U_B(\tau)}{\tau} \right]^2 + \left[\psi(T_B) \frac{U_B(T_B)}{T_B} \right]^2 + \left[\psi(k_{qV}) \frac{U_B(k_{qV})}{k_{qV}} \right]^2 + \\ & \left[\psi(P_B) \frac{U_B(P_B)}{P_B} \right]^2 + \left[\psi(\varphi) \frac{U_B(\varphi)}{\varphi} \right]^2 + \left[\psi(P_{B, \text{п. макс}}) \frac{U_B(P_{B, \text{п. макс}})}{P_{B, \text{п. макс}}} \right]^2 + \\ & \left[\psi(\rho_{B, \text{п. макс}}) \frac{U_B(\rho_{B, \text{п. макс}})}{\rho_{B, \text{п. макс}}} \right]^2 \end{aligned} \right\}^{1/2}, \quad (5)$$

где коэффициенты влияния (чувствительности) выражаются следующим образом

$$\psi(m_2) = \frac{m_2}{m_2 - m_1}; \quad \psi(m_1) = -\frac{m_1}{m_2 - m_1}; \quad \psi(\tau) = 1; \quad \psi(T_B) = \frac{1}{2}; \quad \psi(k_{qV}) = 1;$$

$$\psi(P_B) = \frac{P_B}{P_B - \varphi P_{B, \text{п. макс}}}; \quad \psi(\varphi) = \varphi \left(\frac{P_{B, \text{п. макс}}}{P_B - \varphi P_{B, \text{п. макс}}} - \frac{\rho_{B, \text{п. макс}}}{\rho(P_B, T_B, \varphi_B)} \right);$$

$$\psi(P_{B, \text{п. макс}}) = \frac{\varphi P_{B, \text{п. макс}}}{P_B - \varphi P_{B, \text{п. макс}}}; \quad \psi(\rho_{B, \text{п. макс}}) = \frac{\varphi \rho_{B, \text{п. макс}}}{\rho(P_B, T_B, \varphi_B)}.$$

Используя зависимость давления $P_{B, \text{п. макс}}$ и плотности $\rho_{B, \text{п. макс}}$ 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 ± 1) °С, можно рассчитать численные значения коэффициентов влияния. Ниже приведены их средние значения, которые будут использованы при анализе составляющих стандартной неопределенности $q_{v_{\text{ст}}}$, оцениваемых по типу В

$$\psi(P_B) = 1,0142; \quad \psi(\varphi) = 0,0059; \quad \psi(P_{B, \text{п. макс}}) = 0,0145; \quad \psi(\rho_{B, \text{п. макс}}) = 0,0087;$$

$$\psi(m_2) = \frac{1000}{1000 - 200} = 1,25; \quad \psi(m_1) = -\frac{2000}{1000 - 200} = -0,25; \quad \psi(\tau) = 1; \quad \psi(T_B) = \frac{1}{2}; \quad \psi(k_{qV}) = 1.$$

Составляющими неопределенности весоизмерительного узла ИЭУ по типу В являются неопределенность используемых весов «Mettler Toledo» РВ 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 $\Delta m_k = 20$ мг на отметке шкалы весов 1,2 кг при доверительной вероятности 0,95 и коэффициенте охвата 2

$$\frac{U_B(\Delta m_k)}{m_k} = \frac{20 \times 10^{-6}}{2 \times 1,2 \times \sqrt{3}} = 4,8 \times 10^{-6} (4,8 \times 10^{-4} \%).$$

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

$$\frac{U_B(R)}{m_R} = \frac{\frac{R}{2} \cdot 10^{-3}}{m_R \sqrt{3}} = \frac{0,01 \cdot 10^{-3}}{0,8 \cdot \sqrt{3}} = 3,6 \cdot 10^{-6} (3,6 \cdot 10^{-4} \%).$$

Стандартная неопределенность, оцениваемая по типу В и обусловленная отклонением показаний весов в составе весоизмерительного узла ИЭУ от массы взвешиваемой гири $(\Delta m_{\Gamma})_{\max}$ может быть определена как

$$\frac{U_B(\Delta m_{\Gamma})}{m_{\Gamma}} = \frac{(\Delta m_{\Gamma})_{\max}}{\sqrt{3} \cdot m_{\Gamma}} = \frac{0,12 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{3} \cdot 0,8} = 8,7 \cdot 10^{-5} (8,7 \cdot 10^{-3} \%).$$

Применяя правила геометрического суммирования, можно рассчитать неопределенность по типу В взвешивания заполненного ГСС

$$\begin{aligned} \frac{U_B(m_2)}{m_2} &= \sqrt{\left[\frac{U_B(\Delta m_k)}{m_k} \right]^2 + \left[\frac{U_B(R)}{m_R} \right]^2 + \left[\frac{U_B(\Delta m_{\Gamma})}{m_{\Gamma}} \right]^2} = \\ &= \sqrt{(4,8 \cdot 10^{-6})^2 + (3,6 \cdot 10^{-6})^2 + (8,7 \cdot 10^{-5})^2} \approx 8,7 \cdot 10^{-5} (8,7 \cdot 10^{-3} \%). \end{aligned}$$

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

$$\frac{U_B(m_1)}{m_1} = 3,5 \cdot 10^{-4} (3,6 \cdot 10^{-2} \%).$$

На результат взвешивания массы газа, перепущенного в ГСС, влияние оказывают параметры атмосферы: температура окружающего воздуха t_B , барометрическое давление P_B и относительная влажность φ_B . 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:

$$\frac{0,001}{\sqrt{3} \cdot 1440} \cdot 100\% = 0,00004\%; \quad \frac{0,001}{\sqrt{3} \cdot 29} \cdot 100\% = 0,002\%.$$

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 $T_B = t_B + 273,15$

$$\frac{U_B(T_B)}{T_B} = \frac{0,1}{2 \cdot 293,15 \cdot \sqrt{3}} = 9,8 \cdot 10^{-5} (9,8 \cdot 10^{-3} \%).$$

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

$$\frac{U_B(P_B)}{P_B} = \frac{15}{2 \cdot 101325 \cdot \sqrt{3}} = 4,3 \cdot 10^{-5} (4,3 \cdot 10^{-3} \%).$$

Неопределенность измерения относительной влажности атмосферного воздуха, оцениваемую по типу В, определяется неопределенностью калибровки измерительного преобразователя влажности

$$\frac{U_B(\varphi)}{\varphi} = \frac{2}{2 \cdot 60 \cdot \sqrt{3}} = 9,6 \cdot 10^{-3} (9,6 \cdot 10^{-1} \%).$$

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

$$\frac{U_B(k_{qV})}{k_{qV}} = \frac{0,00005}{1} = 5 \cdot 10^{-5} (5 \cdot 10^{-3} \%)$$

Аналогично могут быть определены неопределенности, оцениваемые по типу В, давления $P_{B,п.маx}$ и плотности $\rho_{B,п.маx}$ насыщенного водяного пара

$$\frac{U_B(\rho_{в.п.маx})}{\rho_{в.п.маx}} = \frac{0,000005}{0,02383} = 2,1 \cdot 10^{-4} (2,1 \cdot 10^{-2}\%);$$

$$\frac{U_B(\rho_{в.п.маx})}{\rho_{в.п.маx}} = \frac{0,00005}{0,01729} = 2,9 \cdot 10^{-3} (2,9 \cdot 10^{-1}\%).$$

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 м³/ч) и больших (от 20 до 100 м³/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 $\frac{U_B(x_i)}{x_i} \cdot 100\%$
$\frac{U_B(m_2)}{m_2}$	Взвешивание заполненного воздухом ГСС	0,009%
$\frac{U_B(m_1)}{m_1}$	Взвешивание «пустого» ГСС	0,035%
$\frac{U_B(\tau)}{\tau}$	Измерение времени заполнения	малый расход 0,0004%
		большой расход 0,02%
$\frac{U_B(q_m^{(э)})}{q_m^{(э)}}$	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)

$$U_C(q_{vst}) = \sqrt{U_A^2(q_{vst}) + U_B^2(q_{vst})}. \quad (6)$$

Расширенную стандартную неопределенность рассчитывают по формуле

$$U_p(q_{vst}) = k \cdot U_C(q_{vst}), \quad (7)$$

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 $\frac{U_B(x_i)}{x_i} \cdot 100\%$
$\frac{U_B(q_m^{(э)})}{q_m^{(э)}}$	Массовый расход	малый расход 0,014%
		большой расход 0,022%
$\frac{U_B(T_B)}{T_B}$	Температура атмосферного воздуха перед соплом	0,01%
$\frac{U_B(P_B)}{P_B}$	Барометрическое давление (давление перед соплом)	0,0043%
$\frac{U_B(k_{qv})}{k_{qv}}$	Поправочный коэффициент по объемному расходу влажного воздуха	0,005%
$\frac{U_B(\rho_{в.п.маx})}{\rho_{в.п.маx}}$	Давление насыщенного водяного пара	0,02%
$\frac{U_B(\rho_{в.п.маx})}{\rho_{в.п.маx}}$	Плотность насыщенного водяного пара	0,29%
$\frac{U_B(\phi)}{\phi}$	Относительная влажность атмосферного воздуха	1,0%
$\frac{U_B(q_{vst})}{q_{vst}}$	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 τ 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 τ , получить постоянный расход q_m , соот-

ветствующий 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 эта-

лонных 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].

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 (2006).
2. А.П. Герасимов, В.П. Иванов, В.М. Красавин, В.М. Лахов, С.В. Раинчик, О.К. Семенова, *Область применения сопел Лаваля в расходоизмерительной технике*, Измерительная техника, 4, С. 48 (2005).
3. Д.А. Браславский, В.В. Петров. *Точность измерительных устройств*. Машиностроение, Москва, 1976. 312 с.
4. Горюнова С.М., Хамраева Д.К., Сопин В.Ф. Организация процедур аттестации и утверждения эталонов единиц величин, используемых в сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений // Вестник Казанского технологического университета, 16, С.236 (2012).

© **В. М. Красавин** - канд. техн. наук, доц., ФГУП ВНИИР, kras.84@mail.ru; **С.В. Раинчик** - ст. науч. сотр. ФГУП ВНИИР; **В. П. Ившин** - канд. техн. наук, доц. каф. АССОИ КНИТУ, ivshin2007@yandex.ru; **А. В. Красавин** - асп. каф. САНУТИ КНИТУ.