

ЭТАЛОНЫ

Научная статья

УДК 53.089.6:006.91

<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2024-20-4-20-35>



Определение интервала между аттестациями эталона на основании модели процесса измерений во времени

Р. А. Тетерук  , Н. А. Фирсанов , А. А. Пименова , А. А. Кокшаров 

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева»,
г. Санкт-Петербург, Россия
 r.a.teteruk@vniim.ru

Аннотация: Определение и назначение обоснованных интервалов между аттестациями эталонов является важной задачей обеспечения единства измерений. Эталоны предназначены для дальнейшей передачи единицы нижестоящим по поверочной схеме эталонам и средствам измерений. Следовательно, превышение метрологическими характеристиками допустимых значений в процессе эксплуатации неприемлемо, поскольку может повлечь недостоверность дальнейшей передачи единицы по цепи прослеживаемости. Нахождение оптимального интервала между аттестациями, в течение которого метрологические характеристики эталона не превысят допустимых значений, позволит снизить данный риск.

В статье предложен один из вариантов определения интервала между аттестациями – на основе анализа модели измерений эталона и моделирования зависимости от времени границ погрешности оценок входных величин, в том числе – с учетом факторов, не участвующих напрямую в процессе измерений, но влияющих на этот процесс.

Ключевые слова: аттестация, эталон, подтверждение соответствия, интервал между аттестациями, неисключенная систематическая погрешность

Принятые сокращения: МАИ – интервалы между аттестациями; СИ – средства измерений; НСП – неисключенная систематическая погрешность; СКО – среднее квадратическое отклонение; МПИ – интервал между поверками; ИПС – измерительная поршневая система.

Ссылка при цитировании: Определение интервала между аттестациями эталона на основании модели процесса измерений во времени / Р. А. Тетерук [и др.] // Эталоны. Стандартные образцы. 2024. Т. 20, № 4. С. 20–35. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2024-20-4-20-35>.

Статья поступила в редакцию 11.10.2024; одобрена после рецензирования 11.11.2024; принята к публикации 25.12.2024.

MEASUREMENT STANDARDS

Research Article

Determination of an Interval Between Certifications of the Standard Based on the Measurement Process Model in Time

Roman A. Teteruk , Nikita A. Firsanov , Anastasia A. Pimenova ,
Andrei A. Koksharov 

D. I. Mendeleyev Institute for Metrology, St. Petersburg, Russia
 r.a.teteruk@vniim.ru

Abstract: Determination and assignment of reasonable intervals between certifications of standards is an important task to ensure the uniformity of measurements. The standards are intended for further transfer of the unit to standards and measuring instruments lower down the verification scheme, which means that exceeding the permissible values by metrological characteristics during operation is unacceptable, since it may lead to unreliability of the further transfer of the unit along the traceability chain. This risk can be reduced by finding the optimal interval between certifications, during which the metrological characteristics of the standard will not exceed the permissible values.

The article proposes one of the options for determining the interval between certifications based on the analysis of the measurement model of the standard and modeling the time dependence of the error limits of the estimates of input quantities, including taking into account factors that are not directly involved in the measurement process but influence this process.

Keywords: certification, standard, conformity assessment, interval between certifications, non-excluded systematic error

Abbreviations used: MI – measuring instruments; NESE – non-excluded systematic error; SD – standard deviation; MC – metrological characteristics.

For citation: Teteruk R. A., Firsanov N. A., Pimenova A. A., Koksharov A. A. Determination of an interval between certifications of the standard based on the measurement process model in time. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2024;20(4):20–35. (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2024-20-4-20-35>.

The article was submitted 11.10.2024; approved after reviewing 11.11.2024; accepted for publication 25.12.2024.

Введение

В большинстве случаев воспроизводимая эталоном единица величины зависит от других измеряемых или контролируемых входных величин. Для эталонов единиц величин, в измерения которых заложен косвенный метод измерений, экспериментального подтверждения соответствия может быть недостаточно.

В таких случаях необходимо рассчитывать бюджет погрешности и оценивать вклад каждой входной величины и ее влияние на основную выходную величину. Для подтверждения соответствия полученная оценка бюджета погрешности измерений аттестуемого эталона не должна превышать установленных поверочной схемой предельных значений обязательных

метрологических требований, предъявляемых к эталону. Здесь речь может идти как о непосредственно НСП измерений Θ или ее доверительных границах при заданной вероятности, так и о суммарном СКО S_{Σ} , включающем в себя НСП в зависимости от способа выражения точности эталона.

Целью исследования является разработка способа обоснованного определения МАИ эталонов, гарантирующего соответствие МХ обязательным требованиям в процессе эксплуатации путем моделирования изменения этих МХ во времени.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) проанализировать общий случай оценки МХ эталона на основе модели процесса измерений;
- 2) разработать метод моделирования во времени МХ эталона для различных вариантов определения и нормирования составляющих его погрешности;
- 3) установить критерий соответствия эталона установленным требованиям в ходе эксплуатации;
- 4) опробовать разработанный метод на нескольких эталонах.

Материалы и методы

Уравнение измерений эталона единицы величины Y можно представить в обобщенном виде¹:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n), \quad (1)$$

где $X_1, X_2, \dots, X_n$ – входящие в уравнение составляющие (входные величины);

n – количество составляющих;

f – вид функциональной зависимости.

¹ ГОСТ 8.381-2009 Государственная система обеспечения единства измерений. Эталоны. Способы выражения точности.

Примем допущение о неизменности со временем вида функциональной зависимости и получении оценки x_i входной величины X_i при $i = \overline{1, n}$ по результатам однократного прямого измерения при пренебрежимо малых случайных погрешностях². Тогда за НСП результата измерения каждой входной величины можно принять границы ее погрешности Δ_{xi} . Бюджет НСП будет выглядеть так, как представлено в табл. 1.

Значение НСП также вычисляется в зависимости от количества составляющих в уравнении измерений. В случае, когда количество составляющих больше или равно четырем, доверительную границу НСП можно найти по формуле

$$\theta_Y(P) = k \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \cdot \Delta_{xi}^2}, \quad (2)$$

где k – коэффициент, определяемый выбранной доверительной вероятностью P и числом составляющих НСП (для количества составляющих больше четырех и при доверительной вероятности 95 % коэффициент равен 1,1).

Действительная погрешность составляющих, согласно теории метрологической надежности [1, 2], будет иметь зависимость от времени и может быть представлена в виде $\Delta_{xi}(\tau)$, где τ – время. Следовательно, и значение НСП так или иначе будет зависеть от времени и может быть представлено в виде $\theta_Y(\tau)$. Тогда в задаче определения МАИ эталона уравнение (2) можно переписать в виде

$$\theta_Y(P, \tau) = k \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \cdot \Delta_{xi}(\tau)^2}. \quad (3)$$

² Р 50.2.038-2004 Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые однократные. Оценивание погрешностей и неопределенности результата измерений.

Таблица 1. Бюджет НСП

Table 1. Non-excluded systematic error budget

Входные величины	Численное значение	Погрешность	Коэффициент чувствительности	НСП
X_i	x_i	Δ_{xi}	$\frac{\partial f}{\partial x_i}$	$\Theta_{xi} = \left \frac{\partial f}{\partial x_i} \right \cdot \Delta_{xi}$

Если погрешность оценки входной величины X_i определяется в ходе аттестации, за Δ_{xi} принимается найденное значение погрешности. В данном случае зависимость составляющей от времени при первичной аттестации неизвестна и для ее нахождения можно использовать оценку возможного максимального дрейфа. Оценка изменения входной величины производится либо исходя из известной зависимости для СИ аналогичных применяемому, либо, если по входной величине X_i непосредственно передается единица величины Y , в ходе аттестации эталона за максимальную оценку можно принять величину нестабильности применяемого для передачи единицы эталона. Другим способом определения зависимости погрешности составляющих от времени является нахождение данной зависимости в ходе проведения первичной аттестации путем проведения двух последовательных определений Δ_{xi} через некоторый интервал времени. Для оцениваемой таким образом составляющей на момент первичной аттестации предполагается линейная модель изменения погрешности со временем, а действительный вид функциональной зависимости может быть уточнен по результатам периодических аттестаций. Тогда $\Delta_{xi}(\tau)$ можно найти по формуле

$$\Delta_{xi}(\tau) = \Delta_{xi}(\tau_1) + \tau \frac{\Delta_{xi}(\tau_2) - \Delta_{xi}(\tau_1)}{\tau_2 - \tau_1}, \quad (4)$$

где τ_1 и τ_2 – соответственно даты первого определения Δ_{xi} и последующего.

В этом же случае, если передача единицы происходит методом градуировки³, то установленное по формуле (4) изменение со временем градуировочных коэффициентов или значения непосредственно определяемой входной величины включается в бюджет НСП данной входной величины. Стоит отметить, что количество последовательных определений может быть увеличено, а вид функциональной зависимости может быть выбран отличный от линейного в случае, если известен вид функциональной зависимости погрешности от времени,

характерный для обеспечивающего входную величину СИ. При наличии достаточного набора данных об изменении исследуемой величины со временем адекватность модели может быть проверена статистическими методами, например, описанными в приложении Б МИ 3676–2023⁴.

Если измерение X_i обеспечивается СИ с установленными метрологическими характеристиками (например, СИ утвержденного типа), для определения зависимости действительного значения погрешности от времени можно предположить, что действительное значение погрешности Δ_{xi} в период до наступления МПИ с 95-процентной вероятностью не будет превышать значения установленных пределов. Значит, максимально возможный дрейф МХ за МПИ не должен превысить по величине значения границ погрешности. Предполагая при отсутствии информации о виде функциональной зависимости линейную модель, максимальную оценку зависимости действительного значения от времени можно получить, приняв за величину дрейфа за время МПИ значения границ погрешности по формуле

$$\Delta_{xi}(\tau) = \Delta_{xi} \frac{\tau}{T_{xi}}, \quad (5)$$

где T_{xi} – установленный для обеспечивающего измерения X_i СИ МПИ, лет.

Критерий соответствия эталона обязательным метрологическим требованиям в задаче определения МАИ можно записать в виде:

$$\left[\theta_Y(P, T) = k \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \delta_{xi}(T)^2} \right] \leq \theta_{Ymax}, \quad (6)$$

где T – устанавливаемый для аттестуемого эталона МАИ;

θ_{Ymax} – максимально допустимое значение НСП согласно ГПС.

Таким образом, зная зависимость от времени каждой составляющей бюджета НСП, можно найти оптимальный МАИ для эталона по формуле

³ РМГ 74–2004 Рекомендации по межгосударственной стандартизации. Государственная система обеспечения единства измерений. Методы определения межповерочных и межкалибровочных интервалов средств измерений.

⁴ МИ 3676–2023 Государственная система обеспечения единства измерений. Рекомендация. Типовая методика определения продолжительности интервалов между поверками.

$$T = \operatorname{argmax} \left[k \sqrt{\sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial f}{\partial x_i} \right|^2} \delta_{xi}(\tau)^2 \leq \theta_{Ymax} \right], \quad (7)$$

где T_{xi} – МПИ, установленный для обеспечения измерения X_i СИ.

Зависимость $\Delta_{xi}(\tau)$ может быть скорректирована с учетом результатов периодической аттестации по алгоритмам, применяемым при определении интервала между калибровками, например, при помощи контрольных карт Шухарта или по так называемой лестнице в соответствии с ILAC-G24/OIML D10⁵.

Кроме входных величин, входящих в уравнение измерений эталона, на процесс измерений в целом либо на точность оценки входных величин могут оказывать влияние условия его применения. При этом влияние на входную величину может быть известно и учтено в модели измерения введением поправки, либо границы контролируемых условий применения могут быть установлены так, чтобы при их соблюдении точность исследуемого эталона находилась в необходимых пределах. Данный подход к исследованию процесса измерений разобран авторами в [3] и может быть применен при решении задачи определения интервала между аттестациями эталонов.

Результаты и обсуждение

С помощью описанных в ГОСТ 8.381-2009 методов была произведена оценка точности эталонного микроманометра с диапазоном измерений разности давлений от 100 до 5 000 Па. Определим МАИ предложенным выше способом.

Уравнение измерений жидкостного микроманометра выглядит следующим образом:

$$P = (\rho_{\text{вод}} - \rho_{\text{возд}}) \cdot g \cdot h \cdot (1 + \alpha \cdot (t_{\text{ш}} - 20)) [4, 5], \quad (8)$$

где P – измеряемое микроманометром давление, Па;

$\rho_{\text{вод}} - \rho_{\text{возд}}$ – плотность воды и воздуха, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

h – разница высот между подвижным и неподвижным сосудом микроманометра, м;

⁵ ILAC-G24/OIML D10: Guidelines for the determination of recalibration intervals of measuring equipment used in testing laboratories. 2019.

α – температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) шкалы;

$t_{\text{ш}}$ – температура шкалы, °С.

Для определения температуры используются два термометра, показания которых t_1 и t_2 усредняются по формуле

$$t = \frac{t_1 + t_2}{2}, \quad (9)$$

а полученная температура принимается за температуру воздуха $t_{\text{возд}}$, температуру воды $t_{\text{вод}}$ и шкалы микроманометра $t_{\text{ш}}$:

$$t = t_{\text{возд}} = t_{\text{вод}} = t_{\text{ш}}. \quad (10)$$

Плотность воды $\rho_{\text{вод}}$ по данным таблиц ГСССД⁶ аппроксимируется с точностью до 0,002 уравнением зависимости от температуры

$$\rho_{\text{вод}} = -0,00526 t^2 + 0,00472 t + 1000,21455. \quad (11)$$

Плотность воздуха $\rho_{\text{возд}}$ находят по формуле из ГОСТ OIML R111-1-2009⁷:

$$\rho_{\text{возд}} = \frac{0,0034838 \cdot P_{\text{атм}} - 0,009024 \cdot \varphi \cdot e^{0,0612 \cdot t}}{273,15 + t}, \quad (12)$$

где $P_{\text{атм}}$ – атмосферное давление, кПа;

φ – относительная влажность воздуха, %.

В соответствии с правилами содержания и применения эталонного микроманометра при измерениях должны соблюдаться условия, приведенные в табл. 2. Исходя из нормирования метрологических характеристик (погрешности измерений) средств измерений, обеспечивающих определение перечисленных параметров, необходимо найти значения, в которых НСП составляющих уравнения измерений будут принимать максимальное значение.

Поскольку в уравнении измерений имеется ввиду плотность воздуха в непосредственной близости к воде, в неподвижном сосуде для расчета принимается $\varphi = 100$ %. Погрешность

⁶ ГСССД 355-2019 Государственная система стандартных справочных данных. Теплофизические свойства жидкой воды от давления в тройной точке до 0,3 МПа при температурах от 0 °С до 100 °С.

⁷ ГОСТ OIML R111-1-2009 Государственная система обеспечения единства измерений. Гири классов E1, E2, F1, F2, M1, M1-2, M2, M2-3 и M3. Часть 1. Метрологические и технические требования.

Таблица 2. Условия эксплуатации микроманометра

Table 2. Operating conditions of the micromanometer

Наименование характеристики	Значение
Температура воздуха окружающего воздуха, °C	от +18 до +22
Температура рабочей жидкости, °C	от +18 до +22
Атмосферное давление, кПа	от 84 до 106,7

определения $P_{\text{атм}}$ примем равной $\pm 0,2$ кПа и постоянной во времени ввиду незначительности вклада. Погрешность ТКЛР α и ускорения свободного падения g примем постоянными во времени. Тогда зависимость НСП θ_p будет обусловлена изменением со временем величин погрешности измерений температуры и разницы высот. Для измерения температуры используются два лабораторных термометра с пределами погрешности измерений температуры $\Delta_{t_1} = \Delta_{t_2} = \pm 0,05$ °C. Предел погрешности измерений разницы высот составляет $\Delta_h = \pm 1 \cdot 10^{-5}$ м. Бюджет НСП измерений плотности воды $\rho_{\text{вод}}$, плотности воздуха $\rho_{\text{возд}}$ и измерений температуры t был составлен отдельно по уравнениям (9), (11) и (12). Установлено, что НСП принимает максимальное значение при температуре эксплуатации плюс 22.

С учетом всех входных величин бюджет НСП представлен в табл. 3 и 4 для нижнего предела измерений и верхнего предела измерений разности давлений соответственно.

Можно сделать выводы:

– вклад составляющих НСП, которые зависят от температуры, растет от нижнего предела измерений к верхнему, при этом на нижнем пределе измерений он несущественен;

– основной вклад вносит погрешность определения h .

Передача единицы величины микроманометру от вышестоящего эталона происходит непосредственно по величине. Соответственно для определения зависимости погрешности данной составляющей бюджета от времени были проведены два измерения с промежутком две недели, которые показали, что зависимость Δ_h от времени, полученная по формуле (4), выглядит следующим образом:

$$\Delta_h(\tau) = 0,00001 + 0,000005 \tau, \quad (13)$$

где τ – время, лет.

С учетом формулы (13) бюджет и значение НСП по табл. 3 и 4 справедливы только на момент аттестации.

Таблица 3. Бюджет НСП микроманометра на нижнем пределе измерений (100 Па)

Table 3. The budget of the non-excluded systematic error of the micromanometer at the lower limit of measurements (100 Pa)

Входные величины	Численное значение	Погрешность	Коэффициент чувствительности	Вклад в НСП, % от θ_p
$\rho_{\text{вод}}$	997,771 кг/м ³	$\pm 0,000\,001$ кг/м ³	0,098 146	0,006
$\rho_{\text{возд}}$	0,980 кг/м ³	$\pm 0,000\,050$ кг/м ³	-0,098 146	0,000 04
g	9,814 55 м/с ²	$\pm 0,000\,01$ м/с ²	9,967 921	0,000 10
h	0,01 м	$\pm 0,000\,01$ м	9 783,066	99,993
α	$7,5 \cdot 10^{-7}$ 1/°C	$\pm 5 \cdot 10^{-8}$ 1/°C	195,661	0,000 001 0
t	22 °C	0,035 °C	0,000 073	0,000 000 1

$$\theta_p = 0,10 \text{ Па}$$

Таблица 4. Бюджет НСП микроманометра на верхнем пределе измерений (5 000 Па)
 Table 4. The budget of the non-excluded systematic error of the micromanometer at the upper limit of measurements (5 000 Pa)

Входные величины	Численное значение	Погрешность	Коэффициент чувствительности	Вклад в НСП, % от θ_p
$\rho_{\text{вод}}$	997,771 кг/м ³	$\pm 0,000\,001$ кг/м ³	4,907 282	3,887
$\rho_{\text{возд}}$	0,980 кг/м ³	$\pm 0,000\,050$ кг/м ³	-4,907 282	0,024
g	9,814 55 м/с ²	$\pm 0,000\,01$ м/с ²	498,396 1	0,062
h	0,5 м	$\pm 0,000\,01$ м	9 783,066	96,026
α	$7,5 \cdot 10^{-7}$ 1/°C	$\pm 5 \cdot 10^{-8}$ 1/°C	9 783,052	0,001
t	22 °C	0,035 °C	0,003 669	0,000 04

$$\theta_p = 0,11 \text{ Па}$$

Лабораторные термометры, которые используются в составе эталонного микроманометра, являются СИ утвержденного типа, и для них установлен МПИ, равный одному году. Тогда по формуле (5) зависимость погрешности измерений температуры каждым термометром составит

$$\delta_{t_1}(\tau) = \delta_{t_2}(\tau) = 0,05 \tau, \quad (14)$$

где $\tau \geq 1$ – время с ввода в эксплуатацию, лет. При $\tau < 1$ τ принимается равным 1 году.

Используя формулы (13) и (14), можно составить бюджет оценки НСП в момент проведения последующей аттестации. В табл. 5 и 6 представлен бюджет НСП после одного года эксплуатации. В табл. 7 и 8 – для двух лет

эксплуатации для нижнего предела измерений и верхнего соответственно.

Из таблиц видно, что скорость изменения погрешности температуры Δt выше, чем у разницы высот Δh , что приводит к росту вклада зависящих от температуры составляющих в НСП со временем эксплуатации. При соответствии обязательным метрологическим требованиям, предъявляемым к рабочим эталонам, при значении НСП 0,2 Па МАИ микроманометра будет составлять менее двух лет. Дальнейшие расчеты показали, что по имеющимся данным МАИ должен составлять 21 месяц, или 1,75 лет.

Данный метод определения МАИ, основанный на оценке НСП и максимально возможного

Таблица 5. Бюджет НСП в точке 100 Па после 1 года эксплуатации

Table 5. The budget of the non-excluded systematic error at 100 Pa after 1 year of operation

Входные величины	Численное значение	Погрешность	Коэффициент чувствительности	Вклад в НСП, % от θ_p
$\rho_{\text{вод}}$	997,771 кг/м ³	$\pm 0,000\,001$ кг/м ³	0,098 146	0,003
$\rho_{\text{возд}}$	0,980 кг/м ³	$\pm 0,000\,050$ кг/м ³	-0,098 146	0,000 02
g	9,814 55 м/с ²	$\pm 0,000\,01$ м/с ²	9,967 921	0,000 05
h	0,1 м	$\pm 0,000\,015$ м	9 783,066	99,997
α	$7,5 \cdot 10^{-7}$ 1/°C	$\pm 5 \cdot 10^{-8}$ 1/°C	195,661	0,000 000 4
t	22 °C	0,035 °C	0,000 073	< 0,000 000 1

$$\theta_p = 0,15 \text{ Па}$$

Таблица 6. Бюджет НСП в точке 5 000 Па после 1 года эксплуатации

Table 6. The budget of the non-excluded systematic error at 5 000 Pa after 1 year of operation

Входные величины	Численное значение	Погрешность	Коэффициент чувствительности	Вклад в НСП, % от θ_p
$\rho_{\text{вод}}$	997,771 кг/м ³	$\pm 0,000\,001$ кг/м ³	4,907 282	6,703
$\rho_{\text{возд}}$	0,980 кг/м ³	$\pm 0,000\,050$ кг/м ³	-4,907 282	0,041 90
g	9,814 55 м/с ²	$\pm 0,000\,01$ м/с ²	498,396 1	0,107 44
h	0,5 м	$\pm 0,000\,015$ м	9 783,066	93,147
α	$7,5 \cdot 10^{-7}$ 1/°C	$\pm 5 \cdot 10^{-8}$ 1/°C	9 783,052	0,001 035 0
t	22 °C	0,035 °C	0,003 669	0,000 072 8

$$\theta_p = 0,15 \text{ Па}$$

Таблица 7. Бюджет НСП в точке 100 Па после 2 лет эксплуатации

Table 7. The budget of the non-excluded systematic error at 100 Pa after 2 years of operation

Входные величины	Численное значение	Погрешность	Коэффициент чувствительности	Вклад в НСП, % от θ_p
$\rho_{\text{вод}}$	997,771 кг/м ³	$\pm 0,000\,001$ кг/м ³	0,098 146	0,006
$\rho_{\text{возд}}$	0,980 кг/м ³	$\pm 0,000\,050$ кг/м ³	-0,098 146	0,000 01
g	9,814 55 м/с ²	$\pm 0,000\,01$ м/с ²	9,967 921	0,000 03
h	0,01 м	$\pm 0,000\,02$ м	9 783,066	99,993
α	$7,5 \cdot 10^{-7}$ 1/°C	$\pm 5 \cdot 10^{-8}$ 1/°C	195,661	0,000 000 2
t	22 °C	0,07 °C	0,000 073	0,000 000 1

$$\theta_p = 0,20 \text{ Па}$$

Таблица 8. Бюджет НСП в точке 5 000 Па после 2 лет эксплуатации

Table 8. The budget of the non-excluded systematic error at 5 000 Pa after 2 years of operation

Входные величины	Численное значение	Погрешность	Коэффициент чувствительности	Вклад в НСП, % от θ_p
$\rho_{\text{вод}}$	997,771 кг/м ³	$\pm 0,000\,001$ кг/м ³	4,907 282	13,924
$\rho_{\text{возд}}$	0,980 кг/м ³	$\pm 0,000\,050$ кг/м ³	-4,907 282	0,021 97
g	9,814 55 м/с ²	$\pm 0,000\,01$ м/с ²	498,396 1	0,055 80
h	0,05 м	$\pm 0,000\,02$ м	9 783,066	85,997
α	$7,5 \cdot 10^{-7}$ 1/°C	$\pm 5 \cdot 10^{-8}$ 1/°C	9 783,052	0,000 537 5
t	22 °C	0,07 °C	0,003 669	0,000 151 2

$$\theta_p = 0,21 \text{ Па}$$

изменения пределов погрешностей измерений, составляющих вклада в НСП, может быть использован для определения МАИ, а также его дальнейшей корректировки с использованием данных, полученных при периодической аттестации эталона.

Рассмотрим второй пример определения МАИ, в данном случае – для манометра грузопоршневого абсолютного давления [6] с диапазоном измерений от 2 до 20 кПа класса точности 0,005. Манометры грузопоршневые с газовой рабочей средой могут использоваться для измерений абсолютного давления путем введения в их конструкцию аппаратуры, обеспечивающей создание и поддержание вакуума вокруг ИПС, состоящей из поршня и цилиндра с установленными специальными грузами для задания измеряемого давления. Для этого ИПС с установленными специальными грузами располагается под герметично установленным прозрачным колпаком из оргстекла, внутри которого и обеспечивается вакуумирование. В свою очередь, остаточное давление под колпаком контролируется при помощи вакуумметра. В таком режиме пропадает необходимость учитывать выталкивающую силу воздуха, но становится необходимым контроль остаточного давления под колпаком при помощи вакуумметра. Без использования колпака и вакуумной аппаратуры подобные грузопоршневые манометры также можно использовать для измерения избыточного давления.

Уравнение измерений манометра грузопоршневого в режиме измерений избыточного давления выглядит следующим образом:

$$P = \frac{g \sum mK}{Aq}, \quad (15)$$

где P – измеряемое давление, Па;

$$K = \left(1 - \frac{\rho_{\text{в}}}{\rho_{\text{м}}}\right) - \text{коэффициент, учитывающий}$$

выталкивающую силу воздуха;

$\rho_{\text{м}}$ – плотность материала грузов, кг/м³;

$\rho_{\text{возд}}$ – плотность воздуха, кг/м³;

$\sum m$ – сумма действительных масс специальных грузов и поршня с грузоприемным устройством, кг;

g – ускорение свободного падения на месте эксплуатации, м/с²;

$\bar{A}q$ – эффективная площадь ИПС, приведенная к температуре 20 и атмосферному давлению под поршнем, см²;

$q = 1 + (\alpha_{\text{п}} + \alpha_{\text{ц}})(t - 20)$ – коэффициент, учитывающий изменение эффективной площади ИПС в зависимости от температуры;

$\alpha_{\text{п}}, \alpha_{\text{ц}}$ – ТКЛР материала поршня и цилиндра соответственно, 1/°C;

t – температура ИПС, °C.

Плотность материала грузов и плотность воздуха принимаются как константы, численно равные 8000 кг/м³ (справочное значение для немагнитной стали) и 1,2 кг/м³ (плотность воздуха при нормальных условиях: температура 20, атмосферное давление 101,4 кПа). При этих значениях $K = 0,999850$. При составлении бюджета необходимо учесть, что в зависимости от условий проведения измерений плотность воздуха может быть отличной от 1,2 кг/м³. Условия применения рассматриваемого манометра грузопоршневого представлены в табл. 9.

По формуле для плотности воздуха из OIML R111-1-2009⁸ при условиях эксплуатации плот-

⁸ГОСТ OIML R111-1-2009 Государственная система обеспечения единства измерений. Гири классов точности Е (индекса 1), Е (индекса 2), F (индекса 1), F (индекса 2), М (индекса 1), М (индекса 1–2), М (индекса 2), М (индекса 2–3) и М (индекса 3). Часть 1. Метрологические и технические требования.

Таблица 9. Условия эксплуатации манометра грузопоршневого

Table 9. Operating conditions of the piston gauge

Наименование характеристики	Значение
Температура воздуха окружающего воздуха, °C	от +18 до +28
Относительная влажность воздуха, %	от 20 до 80
Атмосферное давление, кПа	от 84 до 106,7

ность воздуха может принимать значения от 0,96 до 1,27 кг/м³. Значит, максимальное отклонение от принятого для расчетов значения составит 0,24 кг/м³. Приняв данное значение за погрешность оценки плотности воздуха и учитывая погрешность плотности материала специальных грузов ± 150 кг/м³, можно оценить погрешность коэффициента, составив бюджет (табл. 10).

Бюджет НСП манометра грузопоршневого в режиме измерений избыточного давления для нижнего и верхнего пределов измерений с учетом бюджета НСП коэффициента, учитывающего выталкивающую силу воздуха, представлен в табл. 11 и 12.

Для манометра грузопоршневого класса точности 0,005 предельно допустимое значение НСП составляет: 0,1 Па – на нижнем пределе измерений в точке 2 кПа; 1 Па – на верхнем пределе измерений в точке 20 кПа. Анализ бюджета НСП показал, что без учета изменения

плотности воздуха в режиме измерений избыточного давления исследуемый грузопоршневой манометр соответствует установленным требованиям. Входные величины g и K и оценки их погрешности в рассматриваемой модели постоянны во времени, а вклад входных величин m и q в результат оценки выходной величины незначителен, что позволяет не учитывать их при моделировании зависимости НСП от времени. Для оценки зависимости от времени выходной величины A было проведено несколько последовательных ее определений, позволивших установить по формуле (4) функциональную зависимость (16):

$$\Delta_A(\tau) = 0,0001 \tau, \quad (16)$$

где τ – время, лет.

При такой скорости изменения эффективной площади со временем в рамках данной модели МАИ составят 3,5 года. Для проверки влияния на НСП и результата определения МАИ

Таблица 10. Бюджет НСП коэффициента, учитывающий выталкивающую силу воздуха
Table 10. The budget of the non-excluded systematic error of the coefficient taking into account the buoyant force of the air

Входные величины	Численное значение	Погрешность	Коэффициент чувствительности	Вклад в НСП, % от θ_K
ρ_m	8 000 кг/м ³	± 150 кг/м ³	$1,25 \cdot 10^{-4}$	0,1
$\rho_{\text{возд}}$	1,2 кг/м ³	$\pm 0,24$ кг/м ³	$1,88 \cdot 10^{-8}$	99,9
$\theta_K = 0,00003$				

Таблица 11. Бюджет НСП манометра грузопоршневого в режиме измерений избыточного давления в точке 2 кПа
Table 11. The budget of the non-excluded systematic error of the piston gauge at 2 kPa

Входные величины	Численное значение	Погрешность	Коэффициент чувствительности	Вклад в НСП, % от θ_{PA}
g	9,814 07 м/с ²	$\pm 0,00001$ м/с ²	199,97	0,1
Σm	0,5 кг	$\pm 0,0000015$ кг	3 925,04	2,7
K	0,999 850	$\pm 0,00003$	1 962,82	66,8
$\bar{A}$	$24,99954 \cdot 10^{-4}$ м ²	$\pm 5 \cdot 10^{-8}$ м ²	-785 023	29,7
q	1,000 018	$\pm 3 \cdot 10^{-6}$	-1 962,49	0,7
$\theta_P = 0,08$ Па				

Таблица 12. Бюджет НСП манометра грузопоршневого в режиме измерений избыточного давления в точке 2 кПа

Table 12. The budget of the non-excluded systematic error of the piston gauge in the mode of measuring excess pressure at 2 kPa

Входные величины	Численное значение	Погрешность	Коэффициент чувствительности	Вклад в НСП, % от θ_{PA}
g	9,814 07 м/с ²	$\pm 0,000\ 01$ м/с ²	199,97	0,1
Σm	5 кг	$\pm 0,000\ 015$ кг	3 925,04	$< 0,000\ 000\ 1$
K	0,999 850	$\pm 0,000\ 03$	19 628,15	68,7
$\bar{A}$	$24,999\ 54 \cdot 10^{-4}$ м ²	$\pm 5 \cdot 10^{-8}$ м ²	-7 850 229	30,5
q	1,000 018	$\pm 3 \cdot 10^{-6}$	-19 624,9	0,7
$\theta_p = 0,08$ Па				

был составлен бюджет НСП при более строгих условиях эксплуатации (табл. 13).

Сравнение результатов оценки НСП до внесения изменений в условия эксплуатации и после представлено в табл. 14 без учета изменения эффективной площади со временем.

Таким образом, более строгие требования к условиям эксплуатации эталона позволили уменьшить НСП почти на 40 %. При этом расчеты НСП с учетом изменения эффективной площади со временем позволяют установить МАИ исследуемого эталона, равный 6 годам.

Рассмотрим модель процесса измерений исследуемого эталона в режиме измерений абсолютного давления. Уравнение измерений в общем виде выглядит следующим образом:

$$P = \frac{g \sum m}{\bar{A} q} - p_{\text{ост}}, \quad (17)$$

где P – измеряемое давление, Па;

$\sum m$ – сумма действительных масс специальных грузов и поршня с грузоприемным устройством, кг;

Таблица 13. Измененные условия эксплуатации манометра грузопоршневого

Table 13. Modified operating conditions of the piston gauge

Наименование характеристики	Значение
Температура воздуха окружающего воздуха, °С	от +18 до +22
Относительная влажность воздуха, %	от 20 до 80
Атмосферное давление, кПа	от 97,4 до 105,4

Таблица 14. Сравнение НСП при различных условиях эксплуатации

Table 14. Comparison of the non-excluded systematic error under different operating conditions

P , Па	θ_k (УЭ* по табл. 9)	θ_p , Па (УЭ по табл. 9)	θ_k (УЭ по табл. 13)	θ_p , Па (УЭ по табл. 13)
2 000	0,000 03	0,08	0,000 008	0,05
20 000		0,8		0,5

* УЭ – условия эксплуатации.

g – ускорение свободного падения на месте эксплуатации, м/с²;

$\bar{A}$ – эффективная площадь ИПС, приведенная к температуре 20 °С и атмосферному давлению под поршнем, см²;

$q = 1 + (\alpha_n + \alpha_c)(t - 20)$ – коэффициент, учитывающий изменение эффективной площади ИПС в зависимости от температуры;

α_n, α_c – ТКЛР материала поршня и цилиндра соответственно, 1/°С;

t – температура ИПС, °С;

$p_{\text{ост}}$ – остаточное давление под куполом, Па.

Введем обозначение $P = \frac{g \sum m}{\bar{A} \cdot q}$, тогда уравнение (17) примет вид:

$$P = P_A - p_{\text{ост}}. \quad (18)$$

Оценка НСП составляющей P_A для нижнего предела измерений и верхнего предела измерений представлена в табл. 15 и 16 соответственно.

Оценка НСП составляющей уравнения измерений для данного режима измерений

оказалась близкой к оценке, полученной для режима измерений избыточного давления при компенсации вклада выталкивающей силы воздуха установлением более строгих требований к условиям эксплуатации, указанной в табл. 14. Изменение НСП со временем в данном режиме измерений будет зависеть не только от изменения со временем эффективной площади, но и от изменения со временем точности измерения остаточного давления при помощи вакуумметра. Оценка погрешности остаточного давления в абсолютном виде будет зависеть от величины остаточного давления ввиду нормирования для вакуумметров погрешности в относительном виде.

Из опыта передачи единицы и использования манометров грузопоршневых абсолютно-го давления известно, что использование пластикового купола не позволяет обеспечить остаточное давление ниже 1,5 Па, а квазистатический режим, при котором производят измерения абсолютного давления, начинается при величине остаточного давления менее

Таблица 15. Бюджет НСП составляющей P_A в точке 2 кПа

Table 15. The budget of the non-excluded systematic error of component P_A at 2 kPa

Входные величины	Численное значение	Погрешность	Коэффициент чувствительности	Вклад в НСП, % от θ_{P_A}
g	9,814 07 м/с ²	$\pm 0,000\ 01$ м/с ²	2 000,0	20
$\sum m$	0,5 кг	$\pm 0,000\ 001\ 5$ кг	3 925,6	2
$\bar{A}$	$24,999\ 535\ 10^{-4}$ м ²	$\pm 5\ 10^{-8}$ м ²	-7 851 409,9	77
q	1,000 018	$\pm 3\ 10^{-6}$	-19 627,8	1

$$\theta_{P_A} = 0,05\ \text{Па}$$

Таблица 16. Бюджет НСП составляющей P_A в точке 20 кПа

Table 16. The budget of the non-excluded systematic error of component P_A at 20 kPa

Входные величины	Численное значение	Погрешность	Коэффициент чувствительности	Вклад в НСП, % от θ_{P_A}
g	9,814 07 м/с ²	$\pm 0,000\ 01$ м/с ²	2 000,0	20
$\sum m$	5 кг	$\pm 0,000\ 015$ кг	3 925,6	2
$\bar{A}$	$24,999\ 54\ 10^{-4}$ м ²	$\pm 5\ 10^{-8}$ м ²	-7 851 409,9	77
q	1,000 018	$\pm 3\ 10^{-6}$	-19 627,8	1

$$\theta_{P_A} = 0,5\ \text{Па}$$

13 Па независимо от измеряемого абсолютного давления. Вакуумирование пространства под куполом происходит при помощи вакуумного насоса. Технические характеристики вакуумного насоса, а также вид подключения и габариты вакуумной системы будут влиять на время достижения необходимого остаточного давления. Величина остаточного давления, при которой можно проводить измерения, устанавливается в условиях эксплуатации. Для контроля остаточного давления используются вакуумметры с пределами допустимой относительной погрешности $\pm 2\%$, $\pm 5\%$ или $\pm 10\%$. Программное обеспечение, применяемое для расчета измеряемого эталоном абсолютного давления, обычно позволяет ввести поправку в показания вакуумметра. Тогда, определив погрешность вакуумметра в ходе аттестации, можно считать, что в момент аттестации математическое ожидание погрешности вакуумметра равно нулю, и это позволяет воспользоваться формулой (5) для определения оценки вклада составляющей в зависимости от времени. МПИ для вакуумметров устанавливаются 1 год, или 365 дней – тогда при, выраженном в днях:

$$\theta_p(T) = 1,1 \sqrt{\theta_{p_A}^2 + \left(\Delta_{p_{\text{ост}}} \frac{T}{365} \right)^2}. \quad (19)$$

Как и для режима избыточного давления, в режиме абсолютного для класса точности

0,005 предел НСП составит: 0,1 Па – в нижней точке диапазона (2 кПа); 1 Па – в верхней точке (20 кПа). Тогда с учетом оценки из табл. 15 и 16 получим, что для соответствия эталона предъявляемым требованиям погрешность оценки остаточного давления должна быть менее 0,08 Па и 0,8 Па для нижнего и верхнего пределов соответственно. Поскольку величина остаточного давления устанавливается неизменной для всего диапазона измерений абсолютного давления, а более строгие требования к погрешности оценки предъявляются в нижней точке диапазона, бюджет целесообразно рассматривать только в этой точке. НСП аттестуемого эталона в нижней точке диапазона измерений в зависимости от времени и погрешности вакуумметра для величин остаточного давления 2, 3 и 5 Па представлены в табл. 17.

Результат определения МАИ таким способом при установленном допустимом значении остаточного давления ниже 3 Па составит: 1 год – при использовании вакуумметра с относительной погрешностью 2%; 0,5 года – при использовании вакуумметра с относительной погрешностью 5%. При использовании вакуумметра с относительной погрешностью 10% МАИ составит менее 0,5 года. При установленном допустимом значении остаточного давления ниже 5 Па даже при использовании вакуумметра с относительной погрешностью 2% МАИ составит 0,5 года.

Таблица 17. НСП манометра грузопоршневого абсолютного давления в точке 2 кПа в зависимости от времени и характеристик вакуумметра

Table 17. The non-excluded systematic error of the absolute pressure piston gauge at 2 kPa depending on time and vacuum gauge characteristics

T, лет	θ_p , Па		
	Относительная погрешность измерений вакуумметром $ \Delta_{p_{\text{ост}}} = 2\%$	Относительная погрешность измерений вакуумметром $ \Delta_{p_{\text{ост}}} = 5\%$	Относительная погрешность измерений вакуумметром $ \Delta_{p_{\text{ост}}} = 10\%$
$p_{\text{ост}} = 2 \text{ Па}$			
0,5	0,05	0,07	0,12
1	0,07	0,12	0,23
2	0,10	0,23	0,44
3	0,14	0,33	0,66

Окончание табл. 17
End of Table 17

T, лет	θ_p , Па		
	Относительная погрешность измерений вакуумметром $ \Delta_{p_{ост}} =2\%$	Относительная погрешность измерений вакуумметром $ \Delta_{p_{ост}} =5\%$	Относительная погрешность измерений вакуумметром $ \Delta_{p_{ост}} =10\%$
$p_{ост}=3\text{ Па}$			
0,5	0,06	0,10	0,17
1	0,08	0,17	0,33
2	0,14	0,33	0,66
3	0,20	0,50	0,99
$p_{ост}=5\text{ Па}$			
0,5	0,07	0,15	0,28
1	0,12	0,28	0,55
2	0,23	0,55	1,10
3	0,33	0,83	1,65

Для манометров грузопоршневых обычно устанавливают МАИ 2 года. Для рассматриваемого случая подобный МАИ возможен только при использовании вакуумметра с относительной погрешностью 2 % при установленном допустимом значении остаточного давления ниже 2 Па. Во всех остальных случаях МАИ должен быть меньше.

Заключение

В статье представлен подход к определению МАИ с помощью анализа модели процесса измерений аттестуемого эталона единицы величины с различными входными величинами. На приведенных примерах показано, что разработанный метод позволяет определить МАИ для эталонов, основанных на различных принципах действия. Кроме того, предложенный метод позволяет определить зависимость МАИ от требований к эксплуатации или применению эталона.

Вклад соавторов: Все авторы внесли равный вклад в работу.

Contribution of the authors: All authors contributed equally to the work.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

Финансирование: Статья подготовлена во исполнение Государственного контракта № ГК 120–61/2024 в рамках работ по НИР «Аттестация».

Funding: The article was prepared in pursuance of State Contract No. GK 120–61/2024 as part of the research and development work «Certification».

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Фридман А. Э. Теория метрологической надежности средств измерений // Измерительная техника. 1991. № 11. С. 3–11.
2. Фридман А. Э. Метрологическая надежность средств измерений и определение межповерочных интервалов // Метрология. 1991. № 9. С. 52–61.
3. Медведевских С. В., Медведевских М. Ю., Карпов Ю. А. Общие подходы к оценке неопределенности результатов воспроизведения единицы содержания воды в твердых веществах и материалах // Измерительная техника. 2015. № 8. С. 65–70.
4. Хансуваров К. И., Цейтлин В. Г. Техника измерения давления, расхода, количества и уровня жидкости, газа и пара: Учебное пособие для техникумов. М. : Издательство стандартов, 1990. 287 с., ил.
5. Совершенствование государственного первичного специального эталона единицы давления для разности давлений ГЭТ 95–75 / О. С. Витковский [и др.] // Эталоны. Стандартные образцы. 2020. Т. 16, № 2. С. 17–20. <https://doi.org/10.20915/2687-0886-2020-16-2-17-20>
6. Садковская И. В., Эйхвальд А. И., Эйхвальд Т. А. Государственный первичный эталон единицы давления для области абсолютного давления в диапазоне $1 \cdot 10^{-1} - 7 \cdot 10^5$ Па ГЭТ 101–2011: анализ состояния и тенденций развития // Эталоны. Стандартные образцы. 2023. Т. 19, № 5. С. 35–44. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2023-19-5-35-44>

REFERENCES

1. Fridman A. E. Theory of metrological reliability of measuring instruments. *Izmeritel'naya texnika*. 1991;11:3–11. (In Russ.).
2. Fridman A. E. Metrological reliability of measuring instruments and determination of calibration intervals. *Metrologiya*. 1991;9:52–61. (In Russ.).
3. Medvedevskix S. V., Medvedevskix M. Yu., Karpov Yu. A. General approaches to assessing the uncertainty of the results of reproducing the unit of water content in solids and materials. *Izmeritel'naya texnika*. 2015;8:65–70. (In Russ.).
4. Xansuvarov K. I., Cejtin V. G. *Texnika izmereniya davleniya, rasxoda, kolichestva i urovnya zhidkosti, gaza i para: Uchebnoe posobie dlya tekhnikumov*. Moscow: Izdatel'stvo standartov; 1990. 287 p., ill. (In Russ.).
5. Vitkovskiy O. S., Teteruk R. A., Gorobey V. N., Pimenova A. A., Firsanov N. A. Improvement of the state primary special standard of the pressure unit for the pressure difference GET 95–75. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2020;16(2):17–20. (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2687-0886-2020-16-2-17-20>
6. Sadkovskaya I. V., Eikhvald A. I., Eikhvald T. A. State primary standard for the pressure unit in the field of absolute pressure in the range $1 \cdot 10^{-1} - 7 \cdot 10^5$ Pa GET 101–2011: analysis of the state and development trends. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2023;19(5):35–44. (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2023-19-5-35-44>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Тетерук Роман Анатольевич – канд. техн. наук, руководитель научно-исследовательского отдела госэталонов в области измерений давления ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»
190005, Россия, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 19
e-mail: r.a.teteruk@vniim.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8057-5220>

Фирсанов Никита Александрович – и. о. руководителя лаборатории госэталонов и научных исследований в области измерений избыточного давления и разности давлений ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»
190005, Россия, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 19
e-mail: n.a.firsanov@vniim.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2495-9959>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Roman A. Teteruk – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Research Department of State Measurement Standards in the field of pressure measurements, D. I. Mendeleyev Institute for Metrology
19 Moskovskiy ave., St. Petersburg, 190005, Russia
e-mail: r.a.teteruk@vniim.ru
<https://orcid.org/0000-0002-8057-5220>

Nikita A. Firsanov – Acting Head of the Laboratory of State Measurement Standards and Scientific Research in the field of overpressure and pressure difference measurements, D. I. Mendeleyev Institute for Metrology
19 Moskovskiy ave., St. Petersburg, 190005, Russia
e-mail: n.a.firsanov@vniim.ru
<https://orcid.org/0000-0002-2495-9959>

Пименова Анастасия Александровна – руководитель сектора перспективных разработок и испытаний в области давления ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»

190005, Россия, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 19
e-mail: a.a.pimenova@vniim.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2016-9607>

Кокшаров Андрей Алексеевич – инженер лаборатории госэталонов и научных исследований в области измерений избыточного давления и разности давлений ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»

190005, Россия, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 19
e-mail: a.a.koksharov@vniim.ru
<https://orcid.org/0009-0001-4393-2057>

Anastasia A. Pimenova – Head of the Advanced Development and Testing Sector in the field of pressure, D. I. Mendeleyev Institute for Metrology

19 Moskovskiy ave., St. Petersburg, 190005, Russia
e-mail: a.a.pimenova@vniim.ru
<https://orcid.org/0000-0003-2016-9607>

Andrei A. Koksharov – Engineer of the Laboratory of State Measurement Standards and Scientific Research in the field of overpressure and pressure difference measurements, D. I. Mendeleyev Institute for Metrology

19 Moskovskiy ave., St. Petersburg, 190005, Russia
e-mail: a.a.koksharov@vniim.ru
<https://orcid.org/0009-0001-4393-2057>