

ЭТАЛОНЫ

Научная статья

УДК 531.788:533.5:621.317.089.68

<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2022-18-3-17-28>



О возможности применения деформационно-частотного способа измерения абсолютного давления газа в эталонных вакуумметрах

Р. Э. Кувандыков  

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева», Санкт-Петербург, Россия
 rskuw@mail.ru

Аннотация: Обеспечение точности вакуумных измерений крайне важное направление в метрологической науке, имеющее критическое значение для промышленности. На сегодняшний день в России при поверке и калибровке вакуумметров в качестве эталонных вакуумметров используются преимущественно иностранные вакуумметры с диапазоном измерений вакуума $P_{\text{нпн}} - P_{\text{впн}}$ 0,1 – 1000 Па. На основе проведенного анализа характеристик применяемых в России эталонных вакуумметров, основанных на различных методах измерений давления газа, можно утверждать, что наиболее точным и распространенным среди эталонных вакуумметров методом измерений является деформационный. Однако деформационный метод обладает рядом ограничений, связанных с необходимостью введения следующих поправок: поправкой на остаточное давление в сравнительной камере, поправкой на влияние температурных эффектов при термостатировании первичного измерительного преобразователя.

Целью данной работы стало исследование соответствия метрологических характеристик вакуумметра, основанного на новом деформационно-частотном способе измерения абсолютного давления газа, требованиям к эталонным вакуумметрам, приведенным в государственных поверочных схемах в области измерений вакуума.

Основными методами исследования стало исследование метрологических характеристик деформационно-частотного вакуумметра с учетом поправки на остаточное давление в сравнительной камере; поправки на влияния температурных эффектов при термостатировании первичного измерительного преобразователя, а также на соответствие метода требованиям государственных поверочных схем в области измерений вакуума. На основе анализа уравнения измерения (с учетом оценки составляющих источников неопределенностей) приведена оценка показателей точности деформационно-частотного способа измерения абсолютного давления газа. Полученные результаты исследования доказали возможность применения деформационно-частотного способа измерения давления с исключением поправки на остаточное давление в сравнительной камере, поправки на влияние температурных эффектов при термостатировании первичного измерительного преобразователя, в эталонных вакуумметрах, соответствующих требованиям государственных поверочных схем в области измерений вакуума.

В результате исследования установлено, что расширенная неопределенность результата измерения давления вакуумметром, основанном на новом деформационно-частотном способе, не превышает 2 %, что позволяет использовать данный способ в эталонных вакуумметрах.

Практическая значимость разработанных научно-методических принципов и технологических решений для расчета и изготовления первичного измерительного преобразователя вакуумметра, основанного на новом способе измерения низкого абсолютного давления и состоит в возможности изготавливать первичный измерительный преобразователь на российских предприятиях с использованием отечественных технологий микросистемной техники.

Ключевые слова: эталонный вакуумметр, средства измерения низкого абсолютного давления газа, вакуумметры, вакуумметрические установки, коэффициент чувствительности, погрешность, неопределенность, деформационно-частотный способ измерения

Ссылка при цитировании: Кувандыков Р. Э. О возможности применения деформационно-частотного способа измерения абсолютного давления газа в эталонных вакуумметрах // Эталон. Стандартные образцы. 2022. Т. 18, № 3. С. 17–28. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2022-18-3-17-28>

Статья поступила в редакцию 17.08.2022; одобрена после рецензирования 15.09.2022; принята к публикации 25.09.2022.

MEASUREMENT STANDARDS

Research Article

On the Possibility of Using the Strain-Frequency Method for Measuring the Absolute Gas Pressure in Reference Vacuum Gauges

Rustam E. Kuvandykov  

D. I. Mendeleev Institute for Metrology, St. Petersburg, Russia

 ruskuw@mail.ru

Abstract: An especially important direction in metrological science is ensuring the accuracy of vacuum measurements, which is crucial for industry. In Russia, predominantly foreign vacuum gauges with a vacuum measurement range $P_{NPI} - P_{VPI}$ 0.1–1000 Pa are used as reference vacuum gauges for verification and calibration of vacuum gauges. On the basis of the analysis of the characteristics of reference vacuum gauges used in Russia based on various methods for measuring gas pressure, it can be argued that the most accurate and common measurement method among reference vacuum gauges is the strain method. However, the strain method has a number of limitations associated with the need to introduce the following corrections: correction for the residual pressure in the comparative chamber, correction for the influence of temperature effects during temperature control of the primary measuring transducer.

The purpose of this work was to study the compliance of the metrological characteristics of a vacuum gauge based on a new strain-frequency method for measuring the absolute gas pressure with the requirements for reference vacuum gauges given in state verification schemes in the field of vacuum measurements.

The main research methods were the study of the metrological characteristics of the strain-frequency vacuum gauge, taking into account the correction for the residual pressure in the comparative chamber; corrections for the influence of temperature effects during temperature control of the primary measuring transducer, as well as for the compliance of the method with the requirements of state verification schemes in the field of vacuum measurements. An assessment of the accuracy indicators of the strain-frequency method for measuring the absolute gas pressure based on the analysis of the measurement equation, taking into account the assessment of the components of the uncertainty sources, is given. The obtained results have shown the possibility of using the strain-frequency method of pressure measurement, with the exception of the correction for the residual pressure in the comparative chamber, corrections for the influence of temperature effects during temperature control of the primary measuring transducer in reference vacuum gauges that meet the requirements of state verification schemes in the field of vacuum measurements.

As a result of the study, it was found that the expanded uncertainty of the result of measuring pressure with a vacuum gauge based on the new strain-frequency method does not exceed 2%. This makes it possible to use this method in reference vacuum gauges. The practical significance of the developed scientific and methodological principles, and technological solutions for calculating and manufacturing the primary measuring transducer of a vacuum gauge based on a new method for measuring low absolute pressure lies in the possibility to manufacture the primary measuring transducer at Russian enterprises using domestic technologies of microsystem technology.

Keywords: reference vacuum gauge, means for measuring low absolute gas pressure, gauges, vacuum gauges, sensitivity coefficient, error, uncertainty, strain-frequency method

For citation: Kuvandykov R. E. On the Possibility of Using the Strain-Frequency Method for Measuring the Absolute Gas Pressure in Reference Vacuum Gauges. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2022;18(3):17–28 <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2022-18-3-17-28> (In Russ.).

The article was submitted 17.08.2022; approved after reviewing 15.09.2022; accepted for publication 25.09.2022.

Введение

Вакуумная техника (в соответствии с ГОСТ 5197–85) на сегодняшний день применяется во многих отраслях промышленности и науки. Вакуумные системы применяются в химии для изучения свойств чистых веществ, для изучения состава и разделения компонентов смесей, скоростей химических реакций. В фармацевтической и пищевой промышленности, где предъявляются значительно более высокие требования к чистоте и сухости, вакуум применяется в основном для удаления кислорода из пищи или таблеток. В металлургической области вакуум необходим при производстве стали и других металлических сплавов для удаления газов из расплавленного металла и предотвращения немедленного окисления. Вакуумные установки применяют более чем в двадцати эталонных установках, расположенных во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева. Таким образом, обеспечение точности измерений вакуумных установок крайне важное направление в метрологической науке, имеющее критическое значение для промышленности. Точное измерение вакуума позволяет контролировать процессы в промышленности, обеспечивать необходимые условия окружающей среды для многих экспериментов в науке и исследованиях. Основной задачей вакуумной метрологии, науки об измерении вакуума, является обеспечение прослеживаемости вакуумных измерений к единицам СИ (в соответствии с ГОСТ 8.271–77).

Как показал проведенный анализ утвержденных типов средств измерений Федерального информационного фонда (ФИФ) по обеспечению единства измерений, на сегодняшний день в России при поверке и калибровке вакуумметров, в качестве эталонных вакуумметров используются преимущественно иностранные вакуумметры. В связи с введением западных санкций против России тема импортозамещения стала наиболее актуальна в настоящее время, в том числе особую актуальность стали приобретать работы по развитию отечественного приборостроения, в частности, и в области вакуумной метрологии [1].

На протяжении многих десятилетий вопросу приборостроения в области вакуума уделялось большое внимание сотрудниками института метрологии им. Д. И. Менделеева: В. А. Рыжовым, В. А. Казаковым, Е. К. Израйловым, В. Н. Горобеем [2, 3]. Были

разработаны эталонные вакуумметрические установки, такие как: ГЭТ 49–2016, ГЭТ 101-2011 и другие, включающие эталонные вакуумметры. Большой вклад в развитие эталонной базы РФ на основе жидкостного метода измерений давления газа внесли И. В. Садковская и А. И. Эйхвальд [4]. Сегодня специалисты ВНИИМ проводят целый ряд разработок средств измерений низкого абсолютного давления газа, основанных на деформационных, жидкостных и вязкостных методах измерения давления газа [5–9].

На основе проведенного анализа данных о процедурах поверки, размещенных в ФИФ в период с 2020 по 2021 гг. в России наиболее востребованным диапазоном измерений вакуума является диапазон $P_{\text{нпн}}$ – $P_{\text{впн}}$ 0,1–1000 Па¹. Обратим внимание, что диапазон измерений вакуума в пределах 0,1–1000 Па совпадает с областью пересечения государственных поверочных схем (ГПС):

- в диапазоне $1 \cdot 10^{-1} - 1 \cdot 10^7$ Па (Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 06.12.2019 № 2900);

- в диапазоне $1 \cdot 10^{-8} - 1 \cdot 10^3$ Па (ГОСТ 8.107–81);

- а также государственных первичных эталонов ГЭТ 49–2016 и ГЭТ 101-2011 [10]. Допускаемая относительная погрешность эталонных вакуумметров в диапазоне 0,1–1000 Па, согласно ГПС, составляет более 2%.

На основе проведенного анализа характеристик применяемых в России эталонных вакуумметров, основанных на различных методах измерений давления газа [11], приведенных в табл. 1, можно утверждать, что наиболее точным и распространенным среди эталонных вакуумметров методом является деформационный.

Однако деформационный метод обладает рядом ограничений, связанных с необходимостью введения следующих поправок: поправкой на остаточное давление в сравнительной камере, поправкой на влияние температурных эффектов при термостатировании первичного измерительного преобразователя [12, 13].

Целью данной работы является исследование соответствия метрологических характеристик вакуумметра, основанного на новом деформационно-частотном способе измерения абсолютного давления газа,

¹ где, $P_{\text{нпн}}$ – нижний предел измерения $P_{\text{впн}}$ – верхний предел измерения

Таблица 1. Метрологические характеристики вакуумметров по методам измерений
Table 1. Metrological characteristics of vacuum gauges by measurement methods

Применяемый в эталонных вакуумметрах метод измерений	Давление, Па											
	10 ⁻⁸	10 ⁻⁷	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹	10	10 ¹	10 ²	10 ³
Деформационный							< 2 %					
Жидкостный								< 2 %				
Тепловой							> 5 %					
Ионизационный	> 5 %											
Вязкостный							< 2 %					

требованиям к эталонным вакуумметрам, приведенным в ГПС в области измерений вакуума. В результате исследования автор предполагает проверить и доказать возможность применения деформационно-частотного способа измерения давления газа с исключением поправки на остаточное давление в сравнительной камере, поправки на влияние температурных эффектов при термостатировании первичного измерительного преобразователя в эталонных вакуумметрах.

Материалы и методы

Запатентованный ранее способ усовершенствования деформационного метода [14] и устройство для его осуществления позволили исключить поправки, характерные для деформационных мембранно-емкостных вакуумметров. Предложенный деформационно-частотный способ основан на упругих свойствах объема газа и состоит в преобразовании давления газа *P* в собственную частоту автоколебаний *f* подвижной пластины-осциллятора (ПП), расположенной между двумя неподвижными пластинами (рис. 1).

Устройство содержит первую (1) и вторую (2) неподвижные плоскопараллельные пластины, которые выполнены из диэлектрического материала, причем на поверхности каждой пластины, обращенной внутрь газового зазора между ними, установлены планарные металлические электроды (3, 4). Между пластинами 1, 2 плоскопараллельно им и с заданными зазорами (*Z*) от них на упругом механическом подвесе (5) с коэффициентом упругости *G_M* расположена электропроводящая тонкая подвижная пластина-осциллятор (6) толщиной *h*.

Физико-математическая модель процесса измерения давления газа деформационно-частотным способом построена на основе закона Бойля-Мариотта для идеального газа (изотермический процесс),

адиабатический процесс рассматривался для двухатомной газовой смеси (воздух).

При осевом смещении ПП на величину *x* на нее действует упругая сила, пропорциональная коэффициенту упругости газовых зазоров:

$$G = \frac{(P_1 - P_2) \cdot S}{x} = \frac{P \cdot S}{Z}, \tag{1}$$

где: *S* – площадь ПП

P – измеряемое абсолютное давление газа, Па;

P₁, P₂ – давление в газовых зазорах 1 и 2.

Так как устройство представляет собой линейный осциллятор [15], то квадрат значения собственной частоты автоколебаний *f* будет пропорционален суммарному коэффициенту упругости и обратно

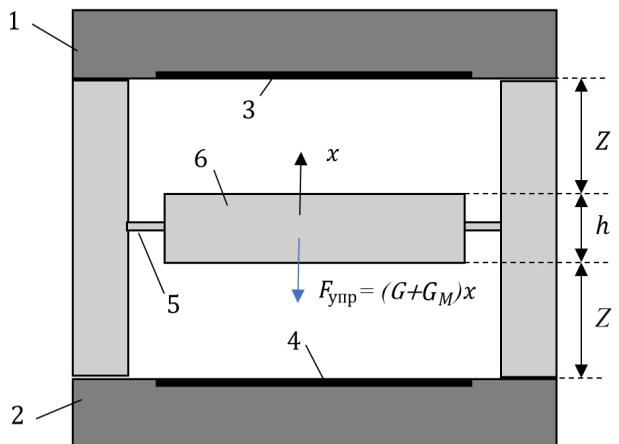


Рис. 1. Эскиз устройства в виде первичного измерительного преобразователя вакуумметра, реализующего деформационно-частотный способ измерения давления газа

Fig. 1. The sketch of the device in the form of the primary measuring transducer of a vacuum gauge that implements the strain-frequency method of measuring gas pressure

пропорционален массе ПП m и согласно формуле (1) измеряемому давлению газа:

$$f^2 = \frac{G + G_M}{4\pi^2 m} = \frac{P \cdot S}{Z} + G_M, \quad (2)$$

Выразив давление P из формулы (2), получим уравнение измерений:

$$P = 2\pi^2 \rho h Z (f^2 - f_M^2) = K(f^2 - f_M^2), \quad (3)$$

где: ρ – плотность материала ПП;

f_M – собственная частота колебаний ПП при «отсутствии» газа;

$K = 2\pi^2 \rho h Z$ коэффициент преобразования.

На основе уравнения измерения (3) автором был разработан алгоритм расчета значений параметров конструкции первичного измерительного преобразователя (рис. 2) в зависимости от целевых метрологических характеристик.

Полученные в результате проведенного расчета параметров конструкции первичного измерительного преобразователя (табл. 2, рис. 3) микрометровые значения определили микросистемную технику в качестве технологии изготовления первичного измерительного преобразователя, обладающую такими преимуществами, как: высокая повторяемость изготовления, групповая технология снижающая себестоимость, миниатюрность и устойчивость изделий к внешним механическим воздействиям [16–18].

Был также разработан вторичный преобразователь в виде измерительного блока и вакуумметр в целом, блок-схема показана на рис. 4.

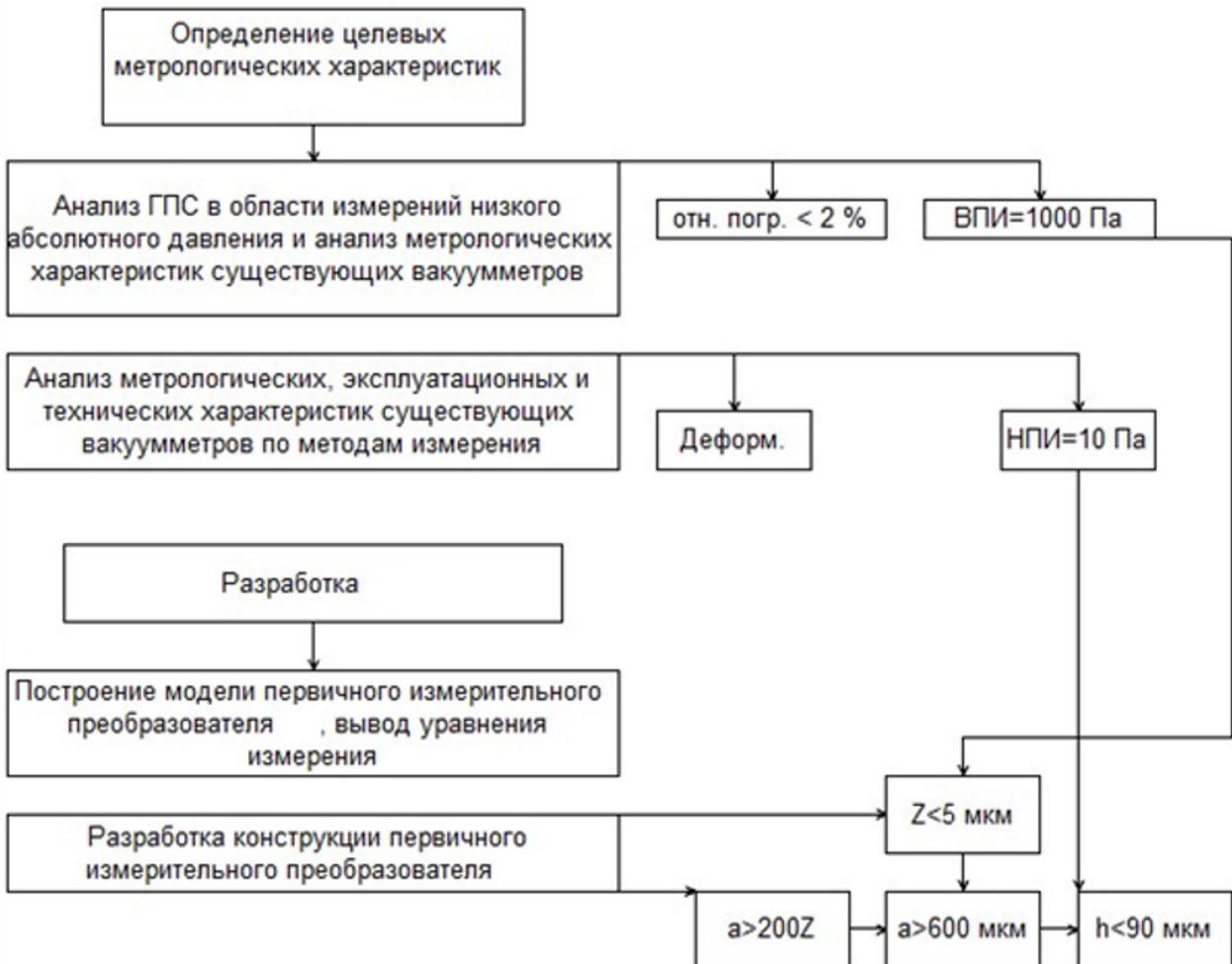


Рис. 2. Алгоритм расчета параметров конструкции первичного измерительного преобразователя деформационно-частотно-го вакуумметра

Fig. 2. The algorithm for calculating the design parameters of the primary measuring transducer of the strain-frequency vacuum gauge

Таблица 2. Параметры конструкции первичного измерительного преобразователя деформационно-частотного вакуумметра

Table 2. The design parameters of the primary measuring transducer of the strain-frequency vacuum gauge

Параметр	Значение, мкм
a, размер ПП	900
Z, толщина газового зазора	3
h, толщина ПП	75

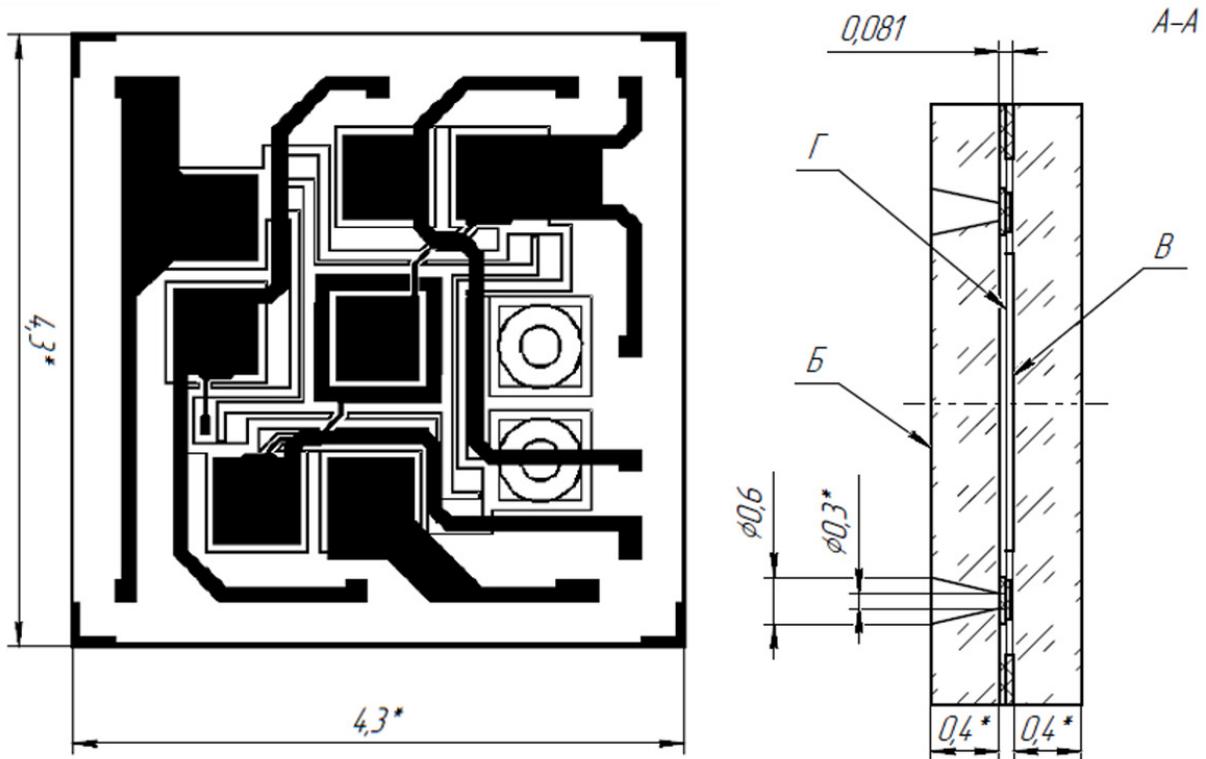


Рис. 3. Эскиз первичного измерительного преобразователя деформационно-частотного вакуумметра

Fig. 3. The sketch of the primary measuring transducer of the strain-frequency vacuum gauge

Измерительный блок содержит: блок измерения положения ПП, блок поддержания автоколебаний, блок автоматического регулирования давления газа в измерительной камере вакуумметрической установки. Внешний вид опытного образца изготовленного вакуумметра приведен на рис. 5 [8].

Оценка показателей точности измерений давления газа изготовленного деформационно-частотного вакуумметра была проведена следующим образом.

В уравнении измерения (3) вакуумметра деформационно-частотного способа измерения давления газа была учтена влияние температуры первичного измерительного преобразователя на результаты измерения и преобразовано к следующему виду [6]:

$$P = \frac{K_{20}}{1 + \alpha \cdot (t - 20)} (f^2 - f_M^2), \quad (4)$$

где K_{20} – градуировочный коэффициент вакуумметра при температуре 20 °С;

α – температурный коэффициент линейного расширения материала ПП преобразователя;

t – температура преобразователя, °С;

f – частота колебаний ПП, Гц;

f_M – частота колебаний ПП при «отсутствии» газа в газовых зазорах.

Значение градуировочного коэффициента K_{20} было получено методом взвешенных наименьших квадратов путем непосредственного сличения с эталонными

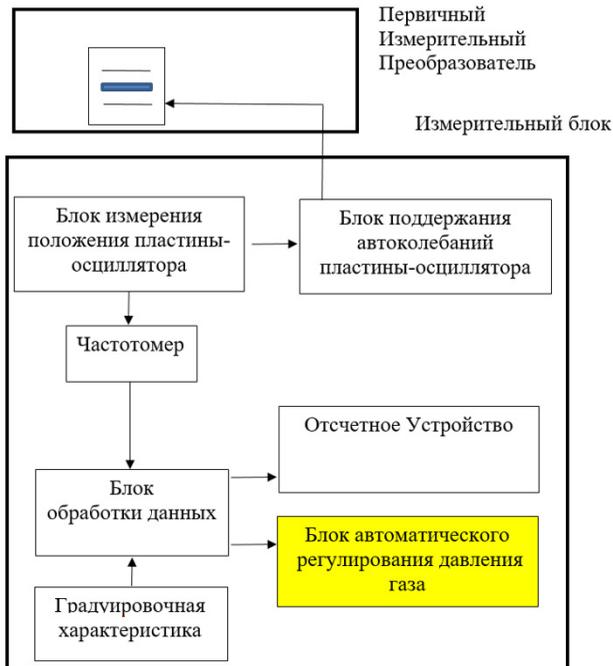


Рис. 4. Блок-схема деформационно-частотного вакуумметра

Fig. 4. The block diagram of the strain-frequency vacuum gauge

вакуумметрами из состава ГЭТ 49–2016 согласно методам построения градуировочных характеристик, изложенных в МИ 2175–91:

$$K_{20} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{(f_i^2 - f_M^2)}{P_{3i}}}{\sum_{i=1}^n \frac{(f_i^2 - f_M^2)^2}{P_{3i}^2}} = 9,77 \cdot 10^{-6} \frac{\text{Па}}{\text{Гц}^2}, \quad (5)$$

где P_{3i} – действительные значения давления газа в диапазоне измерения деформационно-частотного

вакуумметра ($P_{3i} = \frac{P_{\text{НПИ}}}{10^3}$), f_i – соответствующие

давлению значения собственной частоты колебаний ПП ($f_M = f_i$), i – последовательный номер градуировочного значения.

На основе анализа уравнения измерения (5) была проведена оценка неопределенности градуировочного коэффициента K_{20} в виде стандартной неопределенности:

$$u(K_{20}) = 4,4 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Па}}{\text{Гц}^2}$$

На основе уравнения измерения (4) были рассчитаны коэффициенты чувствительности по каждому из источников неопределенности.

Коэффициент чувствительности по градуировочному коэффициенту K_{20} :

$$C_K = \frac{dP}{dK_{20}} = \frac{(f^2 - f_M^2)}{1 + \alpha \cdot (t - 20)} = \frac{P}{K_{20}}, \quad (6)$$

Зависимость квадрата произведения коэффициента чувствительности на стандартную неопределенность от давления показана на рис. 6.

Коэффициент чувствительности по температурному коэффициенту линейного расширения материала ПП α :

$$C_\alpha = \frac{dP}{d\alpha} = -\frac{P}{1 + \alpha} \approx -P, \quad (7)$$

Зависимость квадрата произведения коэффициента чувствительности на стандартную неопределенность от давления показана на рис. 7.



Рис. 5. Опытный образец деформационно-частотного вакуумметра [8]

Fig. 5. The prototype model of the strain-frequency vacuum gauge [8]

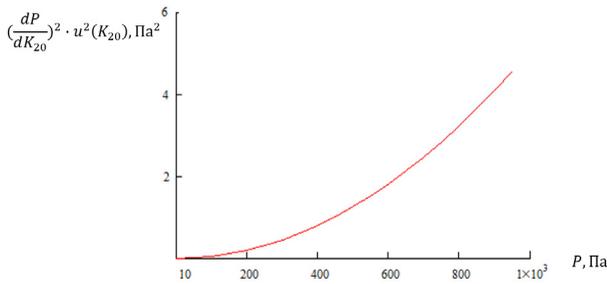


Рис. 6. Зависимость значения $\left(\frac{dP}{dK_{20}}\right)^2 \cdot u^2(K_{20})$ от давления

Fig. 6. The dependence of the value $\left(\frac{dP}{dK_{20}}\right)^2 \cdot u^2(K_{20})$ on pressure

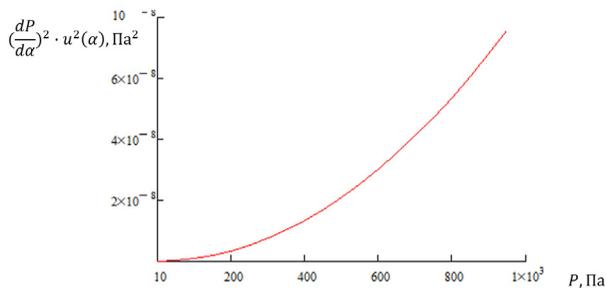


Рис. 7. Зависимость значения $\left(\frac{dP}{d\alpha}\right)^2 \cdot u^2(\alpha)$ от давления

Fig. 7. The dependence of the value $\left(\frac{dP}{d\alpha}\right)^2 \cdot u^2(\alpha)$ on pressure

Коэффициент чувствительности по температуре:

$$C_t = \frac{dP}{dt} = -\frac{P \cdot \alpha}{1 + \alpha} \approx -P \cdot \alpha, \quad (8)$$

Зависимость квадрата произведения коэффициента чувствительности на стандартную неопределенность от давления показана на рис. 8.

Коэффициент чувствительности по частоте:

$$C_f = \frac{dP}{df} = \frac{2 \cdot K_{20}}{1 + \alpha} \cdot \sqrt{\frac{P \cdot (1 + \alpha)}{K_{20}}} + f_M^2 \approx 2\sqrt{PK_{20}}, \quad (9)$$

Зависимость квадрата произведения коэффициента чувствительности на стандартную неопределенность от давления показана на рис. 9.

Коэффициент чувствительности по частоте колебания f_M ПП при условии «отсутствия» газа в газовых зазорах преобразователя:

$$C_{f_M} = \frac{dP}{df_M} = -\frac{2 \cdot K_{20} \cdot f_M}{1 + \alpha \cdot (t - 20)} = -1 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Па}}{\text{Гц}}, \quad (10)$$

Составляющие суммарной стандартной неопределенности результата измерения давления деформационно-частотным вакуумметром приведены в табл. 3, составленной в соответствии с Руководством по выражению неопределенности.

Значение – стандартная неопределенность значения единицы, воспроизводимого или хранимого вышестоящим эталоном, использованным при калибровке².

² Согласно таблице калибровочных и измерительных возможностей (Calibration and Measurement Capabilities CMC), графа ВНИИМ им. Д. И. Менделеева // KCDB [website]. URL: <https://www.bipm.org/kcdb/cmc/quick-search?keywords=pressure>

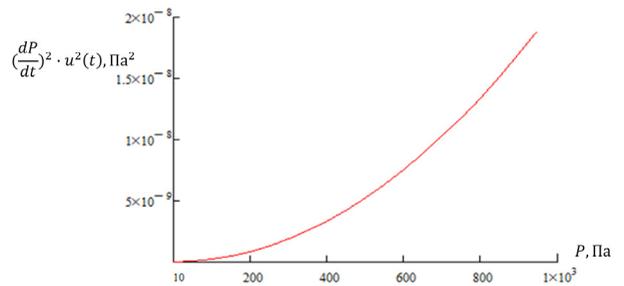


Рис. 8. Зависимость значения $\left(\frac{dP}{dt}\right)^2 \cdot u^2(t)$ от давления

Fig. 8. The dependence of the value $\left(\frac{dP}{dt}\right)^2 \cdot u^2(t)$ on pressure

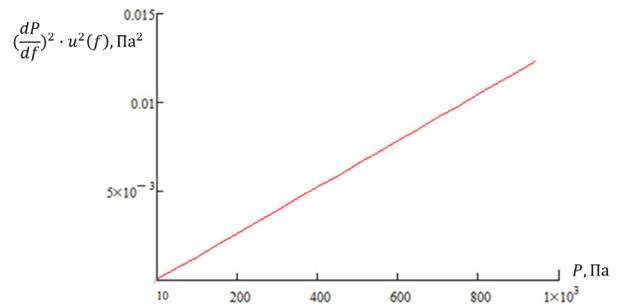


Рис. 9. Зависимость значения $\left(\frac{dP}{df}\right)^2 \cdot u^2(f)$ от давления

Fig. 9. The dependence of the value $\left(\frac{dP}{df}\right)^2 \cdot u^2(f)$ on pressure

Таблица 3. Сводная таблица составляющих стандартной неопределенности результата измерения давления деформационно-частотным вакуумметром при $P=P_{\text{НПИ}}$ Table 3. The summary table of the components of the standard uncertainty of the pressure measurement result by the strain-frequency vacuum gauge at $P=P_{\text{НПИ}}$

Составляющая стандартной неопределенности $u(x_n)$	Источник неопределенности	Значение стандартной неопределенности $u(x_n)$	$C_n = \frac{dP}{dx_n}$	$u_n(P) = C_n u(x_n)$, Па
$u(K_{20})$	Градуировочная характеристика	$4,4 \cdot 10^{-8} \frac{\text{Па}}{\text{Гц}^2}$	$1,0 \cdot 10^6 \text{ Гц}^2$	$4,5 \cdot 10^{-2}$
$u(\alpha)$	Коэффициент теплового расширения материала ПП	$3,0 \cdot 10^{-6} \frac{1}{^\circ\text{C}}$	$-10 \text{ Па} \cdot ^\circ\text{C}$	$3,0 \cdot 10^{-5}$
$u(t)$	Температура первичного измерительного преобразователя	$1,5 \cdot 10^{-5} ^\circ\text{C}$	$-5,0 \cdot 10^{-5} \frac{\text{Па}}{^\circ\text{C}}$	$7,5 \cdot 10^{-6}$
$u(f)$	Частота автоколебаний ПП	$5,8 \cdot 10^{-1} \text{ Гц}$	$2,1 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Па}}{\text{Гц}}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$
$u(f_M)$	Частота автоколебаний ПП при $P < \frac{P_{\text{НПИ}}}{10^3}$	$5,8 \cdot 10^{-1} \text{ Гц}$	$-1 \cdot 10^{-2} \frac{\text{Па}}{\text{Гц}}$	$5,8 \cdot 10^{-3}$
u_A	Стандартная неопределенность измерений, оцениваемая по типу А (при N=10)	$2,0 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$	1	$2,0 \cdot 10^{-2}$
u_z	Стандартная неопределенность значения единицы, воспроизводимого или хранимого вышестоящим эталоном	$3,3 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$	1	$3,3 \cdot 10^{-2}$
$u_c(P) = \sqrt{\sum_{n=1}^7 (c_n u(x_n))^2} = 5,9 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$				

Была рассчитана расширенная неопределенность результата измерения давления при $k=2$:

$$U_{0,95} = k \cdot u_c = 2 \cdot 5,9 \cdot 10^{-3} \cdot P \approx 1,2 \cdot 10^{-2} \cdot P \text{ Па},$$

$$U_{0,95 \text{ ОТН}} = \frac{U_{0,95}}{P} \cdot 100 = 1,2 \%, \quad (11)$$

Таким образом, метрологические характеристики вакуумметра, основанного на новом деформационно-частотном способе измерения абсолютного давления газа позволяют использовать данный способ в эталонных вакуумметрах, соответствующих требованиям ГПС в области измерений вакуума.

Заключение

На основе анализа уравнения измерения, с учетом оценки составляющих источников неопределенностей приведена оценка показателей точности деформационно-частотного способа измерения абсолютного давления газа. Полученные результаты исследования доказали возможность применения деформационно-частотного способа измерения давления с исключением поправки на остаточное давление в сравнительной камере, поправки на влияние температурных эффектов при термостатировании первичного измерительного преобразователя в эталонных вакуумметрах, соответствующих требованиям государственных поверочных схем в области измерений вакуума.

В результате исследования установлено, что расширенная неопределенность результата измерения давления вакуумметром, основанного на новом деформационно-частотном способе, не превышает 2 %, что позволяет использовать данный способ в эталонных вакуумметрах.

Практическая значимость разработанных научно-методических принципов и технологических решений для расчета и изготовления первичного измерительного преобразователя вакуумметра основана

на новом способе измерения низкого абсолютного давления и состоит в возможности изготавливать первичный измерительный преобразователь на российских предприятиях с использованием технологии микросистемной техники.

Благодарности: Все исследования проводились в ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева».

Acknowledgments: All studies were carried out at the D. I. Mendeleev Institute for Metrology.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Чернышенко А. А. Трансформация системы метрологического обеспечения в области измерений давлений и вакуума // Вакуумная техника и технологии – 2020 : сб. труд. 27-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. 27–29 октября 2020 г. / под ред. Д. К. Кострина и С. А. Марцынюкова. СПб.: Изд-во СПб ГЭТУ ЛЭТИ, 2020. С. 8–10.
2. Горобей В. Н., Израйлов Е. К. Эталонный мембранно-емкостный манометр низких абсолютных давлений // Измерительная техника. 2011. № 4. С. 70–73.
3. Чернышенко А. А. Развитие системы метрологического обеспечения в области вакуумных измерений в работах ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» // Эталоны. Стандартные образцы. 2022. Т. 18. № 2. С. 73–88 <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2022-18-2-73-88>
4. Садковская И. В., Эйхвальд А. И., Эйхвальд Т. А. Лазерный интерференционный масляный манометр государственного первичного эталона единицы давления ГЭТ 101-2011 // Измерительная техника. 2019. № 3. С. 3–7. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2019-3-3-7>
5. Гаршин А. Я., Горобей В. Н., Кувандыков Р. Э. Резонансный вакуумметрический преобразователь, созданный по технологии МЭМС // Вакуумная техника и технологии – 2017 : сб. труд. 24-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 6–8 июня 2017 г. / под ред. д-ра техн. наук А. А. Лисенкова. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ ЛЭТИ, 2017. С. 51–53.
6. Гаршин А. Я., Горобей В. Н., Кувандыков Р. Э. К расчету уравнения измерений МЭМС вакуумметрического преобразователя // Вакуумная техника и технологии – 2018 : сб. труд. 25-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 5–7 июня 2018 г. / под ред. д-ра техн. наук А. А. Лисенкова. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ ЛЭТИ, 2018. С. 125–127.
7. Технология изготовления микромеханического преобразователя низкого абсолютного давления / В. Н. Горобей [и др.] // Вакуумная техника и технологии – 2018 : сб. труд. 25-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 5–7 июня 2018 г. / под ред. д-ра техн. наук А. А. Лисенкова. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ ЛЭТИ, 2018. С. 128–131.
8. Горобей В. Н., Кувандыков Р. Э., Тетерук Р. А. Резонансный вакуумметр // Законодательная и прикладная метрология. 2019. № 6. С. 24–26.
9. Кувандыков Р. Э., Тетерук Р. А., Чернышенко А. А. Исследование отечественного первичного измерительного преобразователя вязкостного вакуумметра // Вакуумная техника и технологии – 2022: сб. труд. 29-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 21–23 июня 2022 г. / под ред. Д. К. Кострина, С. А. Марцынюкова. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ ЛЭТИ, 2022. С. 41–46.
10. Чернышенко А. А. Современное состояние и перспективы развития эталонной базы в области измерений низких абсолютных давлений и вакуума // Вакуумная техника и технологии – 2019 : сб. труд. 26-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. СПб.: СПб ГЭТУ ЛЭТИ, 2019. С. 59–63.
11. Розанов Л. Н. Вакуумное технологическое оборудование. СПб: издательство Политехнического Университета, 2012. 26 с.
12. Садковская И. В., Эйхвальд А. И. Особенности применения мембранно-емкостных вакуумметров Баратрон при измерении низкого абсолютного давления // Вакуумная техника и технология. 2013. Т. 23, № 1. С. 45–46.
13. Мембранно-емкостный преобразователь с компенсацией для первичного эталона давления / И. В. Андронов [и др.] // Вакуумная техника и технологии – 2018 : сб. труд. 25-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 5–7 июня 2018 г. / под ред. д-ра техн. наук А. А. Лисенкова. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ ЛЭТИ, 2018. С. 121–125.
14. Способ измерения низкого абсолютного давления газа и устройство для его осуществления: патент RU2749644 С1, заявл. 23.11.2020; опубл. 16.06.2021.
15. Андронов А. А., Витт А. А., Хайкин С. Э. Теория колебаний. Москва: Наука, 1991. 35 с.
16. Калинкина М. Е., Пирожникова О. И. Микроэлектромеханические системы и датчики. СПб.: Университет ИТМО, 2020. 75 с.
17. Blech J. J. On isothermal squeeze film // Lubricant Technology. 1983. P. 615–620.

18. A MEMS friction vacuum gauge suitable for high temperature environment / D. Tenholte // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2008. Vol. 142, No 10. P. 168–172. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2007.05.031>

REFERENCES

- Chernyshenko A. A. Transformation of the metrological support system in the field of pressure and vacuum measurements. In: *Proceedings of the 27th All-Russian Conference with International Participation Vacuum Technique and Technology – 2020*; 27–29 October 2020; St. Petersburg, Russia. St. Petersburg: SPb GETU LETI; 2020. p. 8–10. (In Russ.).
- Gorobei V. N., Izrailov E. K. Standard diaphragm-capacitive manometer of low absolute pressures. *Measurement Techniques*. 2011;(4):70–73. (In Russ.).
- Chernyshenko A. A. Development of the metrological support system in the field of vacuum measurements in the works of D. I. Mendeleyev Institute for Metrology. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2022;18(2):73–88. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2022-18-2-73-88> (In Russ.).
- Sadkovskaya I. V., Eikhvald T. A., Eikhvald A. I. Laser interference oil manometer of state primary standard of the unit of pressure GET 101-2011. *Measurement Techniques*. 2019;62 (3) 181-187. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2019-3-3-7>
- Gorobei V. N., Garshin A. Ia., Kuvandykov R. E. Resonance vacuum gauge created using MEMS technology. In: *Proceedings of the 24th All-Russian Conference with International Participation Vacuum Technique and Technology – 2017*; 6–8 June 2017; St. Petersburg, Russia. St. Petersburg: SPb GETU LETI; 2017. p. 51–53. (In Russ.).
- Garshin A. Ia., Gorobei V. N., Kuvandykov R. E. On the calculation of the measurement equation for a MEMS vacuum transducer. In: *Proceedings of the 25th All-Russian Conference with International Participation Vacuum Technique and Technology – 2018*; 5–7 June 2018; St. Petersburg, Russia. St. Petersburg: SPb GETU LETI; 2018. p. 125–127. (In Russ.).
- Gorobei V. N., Konakov S. A., Kuvandykov R. E., Popova I. V. Manufacturing technology of a low absolute pressure micromechanical transducer. In: *Proceedings of the 25th All-Russian Conference with International Participation Vacuum Technique and Technology – 2018*; 5–7 June 2018; St. Petersburg, Russia. St. Petersburg: GETU LETI; 2018. p. 128–131. (In Russ.).
- Gorobei V. N., Kuvandykov R. E., Teteruk R. A. Resonant vacuum gauge. *Zakonodatel'naja i prikladnaja metrologija*. 2019;(6):24–26. (In Russ.).
- Kuvandykov R. E., Teteruk R. A., Chernyshenko A. A. Study of the domestic primary measuring transducer of a viscous vacuum gauge. In: *Proceedings of the 29th All-Russian Conference with International Participation Vacuum Technique and Technology – 2022*; 21–23 June 2022; St. Petersburg, Russia. St. Petersburg: SPb GETU LETI; 2022. p. 41–46. (In Russ.).
- Chernyshenko A. A. Current state and prospects of development of the reference base in the field of measurements of low absolute. In: *Proceedings of the 26th All-Russian Conference with International Participation Vacuum Technique and Technology – 2019*; St. Petersburg: SPb GETU LETI; 2019. p. 59–63. (In Russ.).
- Rožanov L. N. Vacuum technological equipment. St. Petersburg: izdatel'stvo Politehnicheskogo Universiteta; 2012. 26 p. (In Russ.).
- Sadkovskaja I. V., Jekhval'd A. I. Features of the use of Baratron membrane-capacitive vacuum gauges for measuring low absolute pressure. *Vakuumnaja tehnika i tehnologija*. 2013;23(1):45–46. (In Russ.).
- Andronov I. V., Gorobei V. N., Izrailov E. K., Lobashev A. A., Kuvandykov R. E., Chernyshenko A. A. Compensated diaphragm-capacitance transducer for primary pressure standard. In: *Proceedings of the 25th All-Russian Conference with International Participation Vacuum Technique and Technology – 2018*; St. Petersburg: SPb GETU LETI; 2018. p. 121–125. (In Russ.).
- Method for measuring low absolute gas pressure and device for its implementation: patent RU2749644 C1. (In Russ.).
- Andronov A. A., Vitt A. A., Hajkin S. Je. Theory of oscillations. Moscow: Nauka; 1991. 35 p. (In Russ.).
- Kalinkina M. E., Pirozhnikova O. I. Microelectromechanical systems and sensors. St. Petersburg: Universitet ITMO; 2020. 75 p.
- Blech J. J. On isothermal squeeze film. *Lubricant Technology*. 1983;615–620.
- Tenholte D., Kurth S., Geßner T., Dötzel W. A MEMS friction vacuum gauge suitable for high temperature environment. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2008;142(10):168–172. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2007.05.031>

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

ГОСТ 5197–85 Вакуумная техника. Термины и определения. Государственный стандарт утвержден и введен постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 27 ноября 1985 М.: Издательство стандартов, 1985. Текст: непосредственный.

ГОСТ 8.271–77 Государственная система обеспечения единства измерений. Средства измерений давления. Термины и определения. Государственный стандарт утвержден и введен постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 19 декабря 1977 г. N2934 М.: Издательство стандартов, 1977. Текст: непосредственный.

ГЭТ 49–2016 Государственный Первичный Специальный Эталон единицы давления для области абсолютных давлений в диапазоне 1·10–6 – 1·103 Па/ институт хранитель ВНИИМ им. Д. И. Менделеева. Текст электронный // Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений: официальный сайт. 2022. URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/12/items/397929>

ГЭТ 101–2011ГПЭ единицы давления для области абсолютного давления в диапазоне 1·10⁻¹ – 7·10⁵ Па/ институт хранитель ВНИИМ им. Д. И. Менделеева. Текст электронный // Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений: официальный сайт. 2022. URL <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/12/items/397807>

МИ 2175–91 ГСИ. Градуировочные характеристики средств измерений. Методы построения, оценивания погрешностей. Разработана НПО «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева», 1991. Текст: непосредственный.

РМГ 91–2009 ГСИ. Совместное использование понятий «погрешность измерений» и «неопределенность измерения». Общие принципы. Издательство Москва Стандартиформ, 2009. Текст: непосредственный.

Руководство по выражению неопределенности. Санкт-Петербург. Издательство ФГУП ВНИИМ 1999. Текст: непосредственный.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Кувандыков Рустам Эгамбердыевич – ведущий инженер отдела государственных эталонов в области измерения давления ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева».

Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, пр. Московский, д. 19
e-mail: ruskuw@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5847-9056>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Rustam E. Kuvandykov – Leading Engineer of the Department of state standards in the field of pressure measurements, D. I. Mendeleev Institute for Metrology.

19 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190005, Russia
e-mail: ruskuw@mail.ru
<https://orcid.org/0000-0002-5847-9056>