

ЭТАЛОНЫ

Обзорная статья
УДК 531.787.4:006.91
<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-1-14-21>



О перспективах развития жидкостной манометрии в области низкого абсолютного давления (0,1–1 000 Па)

Т. А. Эйхвальд ✉

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

Аннотация: В данной статье определяются возможные пути совершенствования лазерного интерференционного масляного манометра из состава ГЭТ 101-2011 – Государственного первичного эталона единицы давления для области абсолютного давления в диапазоне $1 \cdot 10^{-1} \div 7 \cdot 10^5$ Па, основанные на анализе результатов исследований, проведенных во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева в период с 2018 по 2021 год.

В статье описан принцип действия лазерного интерференционного масляного манометра из состава ГЭТ 101-2011 и бюджет его погрешностей. Приведено сравнение метрологических характеристик лазерного интерференционного масляного манометра с зарубежными аналогами на основе результатов международных ключевых сличений. Рассмотрены проблемы измерения низкого абсолютного давления в диапазоне 0,1–1 000 Па с помощью лазерного интерференционного масляного манометра и возможные пути решения данных проблем. Описано исследование влияния эффектов дегазации и сжимаемости на значение плотности рабочей жидкости лазерного интерференционного масляного манометра, приведен анализ результатов исследования. Описана идея повышения разрешения измерений давления с помощью лазерного интерференционного масляного манометра. Произведен анализ возможностей измерения давления с помощью лазерного интерференционного масляного манометра при условии оснащения его оптическим интерференционным устройством с фазовой модуляцией с целью увеличения разрешения манометра и с учетом результатов исследований физико-химических свойств рабочей жидкости манометра.

Фактический материал для анализа почерпнут из публикаций в отечественных и зарубежных источниках. Эмпирические данные взяты из опыта работы научно-исследовательского отдела государственных эталонов в области измерений давления, где трудится автор статьи.

Ключевые слова: первичный эталон, абсолютное давление, жидкостный манометр, интерференция, фазовая модуляция

Принятые сокращения: ГЭТ 101-2011 – Государственный первичный эталон единицы давления для области абсолютного давления в диапазоне от $1 \cdot 10^{-1} \div 7 \cdot 10^5$ Па; ЛИММ – лазерный интерференционный масляный манометр; ВНИИМ – Всероссийский научно-исследовательский институт им. Д. И. Менделеева, Россия; NIST – National Institute of Standards and Technology, USA; PTB – Physikalische-Technische Bundesanstalt National Metrology Institute, Germany; НМИ – национальный метрологический институт.

Ссылка при цитировании: Эйхвальд Т. А. О перспективах развития жидкостной манометрии в области низкого абсолютного давления (0,1–1 000 Па) // Эталоны. Стандартные образцы. 2025. Т. 21, № 1. С. 14–21. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-1-14-21>.

Статья поступила в редакцию 28.10.2024; одобрена после рецензирования 23.12.2024; принята к публикации 25.03.2025.

MEASUREMENT STANDARDS

Review Article

On the Development Prospects of Liquid Manometry in the Field of Low Absolute Pressure (0.1–1 000 Pa)

Tatiana A. Eikhvald ✉

D. I. Mendeleev Institute for Metrology, St. Petersburg, Russia
✉ eikhwald@mail.ru

Abstract: The article describes the principle of operation of a laser interferometric oil manometer from the GET 101-2011 – State Primary Measurement Standard for the pressure unit in the field of absolute pressure in the range $1 \cdot 10^{-1} \div 7 \cdot 10^5$ Pa and its error budget. The article compares the metrological characteristics of the laser interferometric oil manometer with foreign analogues based on the results of international key comparisons. The problems of measuring low absolute pressure in the range of 0.1–1 000 Pa using the laser interferometric oil manometer and possible solutions to these problems are considered. A study of the influence of degassing and compressibility effects on the density of the working fluid of the laser interferometric oil manometer is described, and an analysis of the research results is presented. The idea of increasing the resolution of pressure measurements using the laser interferometric oil manometer is described. An analysis of the possibilities of measuring pressure using the laser interferometric oil manometer is carried out, provided that it is equipped with an optical interferometric device with phase modulation in order to increase the resolution of the pressure manometer and taking into account the research results of the physico-chemical properties of the working fluid of the pressure manometer.

Keywords: primary standard, absolute pressure, liquid manometer, interference, phase modulation

Abbreviations used: GET 101-2011 – State Primary Measurement Standard for the pressure unit in the field of absolute pressure in the range $1 \cdot 10^{-1} \div 7 \cdot 10^5$ Pa; LIOM – laser interferometric oil manometer; VNIIM – D. I. Mendeleev Institute for Metrology, Russia; NIST – National Institute of Standards and Technology, USA; PTB – Physikalische-Technische Bundesanstalt National Metrology Institute, Germany; NMI – national metrological institute.

For citation: Eikhvald T. A. On the development prospects of liquid manometry in the field of low absolute pressure (0.1–1 000 Pa). *Measurement Standards. Reference Materials*. 2025;21(1):14–21. (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-1-14-21>.

The article was submitted 28.10.2024; approved after reviewing 23.12.2024; accepted for publication 25.03.2025.

Введение

В настоящее время первичными эталонами давления в области низких абсолютных давлений 0,1–1 000 Па служат установки со статической экспансией газа и жидкостные манометры. Вместе с тем ряд стран (США, Германия, Швеция) ведет работы по созданию первичных оптических манометров, принцип действия которых основан на измерении показателя преломления газа при известной его температуре. Однако в современной метрологии такие установки пока не применяются в качестве первичных средств измерения давления. Наивысшей точностью в диапазоне 1–1 000 Па обладает ультразвуковой жидкостный масляный манометр NIST (США).

В 2000-е гг. во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева велись работы по созданию ЛИММ для измерения абсолютного давления газа в диапазоне 0,1–1 000 Па. В 2011 г. ЛИММ вошел в состав ГЭТ 101-2011¹ [1]. Вместе с ЛИММ в состав ГЭТ 101-2011 были включены также лазерный интерференционный ртутный манометр (ЛИРМ) и грузопоршневой манометр с газовой смазкой.

В 2012–2018 гг. прошли ключевые сличения ССМ.Р-К4.2012 [2] в области абсолютного давления в диапазоне 1–10 000 Па, в которых ГЭТ 101-2011 принял участие наряду с эталонами США, ФРГ, Японии, Чехии, Мексики. В диапазоне сличений 1–1 000 Па Государственный первичный эталон РФ представлял ЛИММ. Положительные результаты сличений [2] позволили подтвердить заявленные метрологические характеристики ГЭТ 101-2011, однако выявились и некоторые проблемы ЛИММ, которые будут подробно рассмотрены ниже.

В дальнейшем некоторые страны также решили идти по пути развития жидкостной

манометрии, несмотря на сложность создания и использования устройств такого типа. Причем, например, в 2014 г. в КНР был разработан аналог ультразвукового масляного манометра NIST [3, 4]. В РТВ (Германия) в 2015 г. начались работы по созданию интерференционного лазерного масляного манометра, аналогичного по принципу действия ЛИММ, но обладающего существенно более высоким разрешением [5].

Цель настоящей статьи – определить возможные пути совершенствования измерения низкого абсолютного давления в области 0,1–1 000 Па в Российской Федерации и оценить возможности усовершенствованного ЛИММ. Для этого в статье будут решены следующие задачи:

- описан принцип действия ЛИММ и его метрологические характеристики;
- приведены проблемы, выявленные по результатам международных ключевых сличений;
- сформулированы возможные методы их решения;
- проведен анализ метрологических характеристик ЛИММ после его совершенствования.

Материалы и методы

ЛИММ: принцип действия, уравнение измерений, источники неопределенностей

ЛИММ представляет собой U-образный жидкостный манометр, разность уровней масла в котором измеряется с помощью интерферометра (рис. 1) [6].

Изменение разности давлений в коленах манометра приводит к изменению разности уровней жидкости и, следовательно, к сдвигу интерференционной картины, поэтому уравнение измерений ЛИММ имеет вид

$$p - p_0 = \rho g \frac{N \lambda}{4}, \quad (1)$$

где p – значение измеряемого давления газа; p_0 – остаточное давление газа в коленах сравнения; ρ – плотность масла; g – ускорение свободного падения; N – количество сосчитанных

¹ ГЭТ 101-2011 Государственный первичный эталон единицы давления для области абсолютного давления в диапазоне 1·10⁻¹ ÷ 7·10⁵ Па / Институт-хранитель ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» // Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений : официальный сайт. <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/12/items/397807> (дата обращения: 29.10.2023).

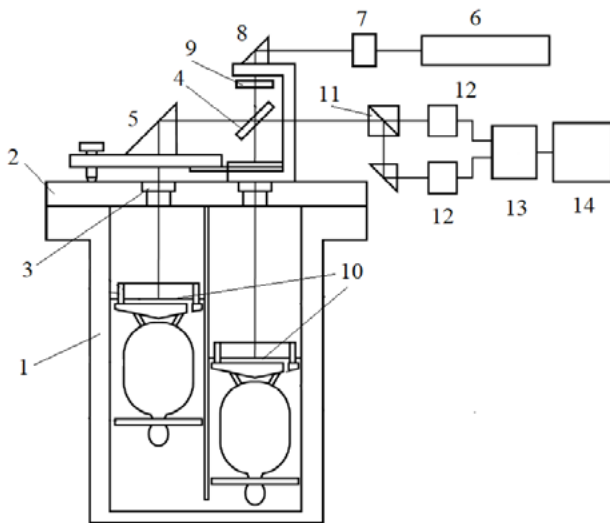


Рис. 1. Принципиальная схема ЛИММ:

1 – корпус ЛИММ; 2 – верхний фланец корпуса; 3 – окна из оптического стекла; 4 – светоделительная пластинка; 5 – поворотная призма; 6 – гелий-неоновый лазер; 7 – оптический изолятор; 8 – поворотная призма; 9 – полуволновая фазовая пластинка; 10 – демпфирующие поплавки; 11 – поляризационный делитель; 12 – фотодиоды; 13 – электронный блок сопряжения с компьютером; 14 – управляющий компьютер

Fig. 1. Schematic diagram of the LIOM:

1 – LIOM frame; 2 – upper flange; 3 – optical glass windows; 4 – beam splitter; 5 – rotary prism; 6 – helium-neon laser; 7 – optical isolator; 8 – rotary prism; 9 – phase half-wave plate; 10 – damping floats; 11 – polarization splitter; 12 – photodiodes; 13 – electronic unit for interface with a computer; 14 – control computer

импульсов (один импульс соответствует половине интерференционной полосы); λ – длина волны лазерного излучения.

Суммарная стандартная неопределенность ЛИММ в зависимости от измеряемого давления p выражается в Па формулой

$$u_c = 3.6 \cdot 10^{-3} + 0.5 \cdot 10^{-4} p (\text{Па}), \quad (2)$$

в которой часть, пропорциональная давлению, определяется, в основном, неопределенностью значения плотности рабочей жидкости, а постоянная часть – разрешением манометра, которое в соответствии с (1) при минимальном регистрируемом сигнале $N=1$ составляет 1,4 мПа. Вклад длины волны лазера и ускорения свободного падения не превосходит 1 ppm.

Проблема измерения плотности масла

Результаты ключевых сличений ССМ.Р-К4.2012 в верхней части диапазона действия ЛИММ (300–1 000 Па) выявили наличие следующей проблемы.

На рис. 2 видно, что расхождение показаний ЛИММ с эталонами других участников (без учета эталона CENAM) имеет систематический характер и составляет около 0,02% от измеряемой величины, что более чем в два раза превышает заявленную неопределенность измерений ЛИММ.

Допущено следующее предположение о причинах этого отклонения. Плотность масла

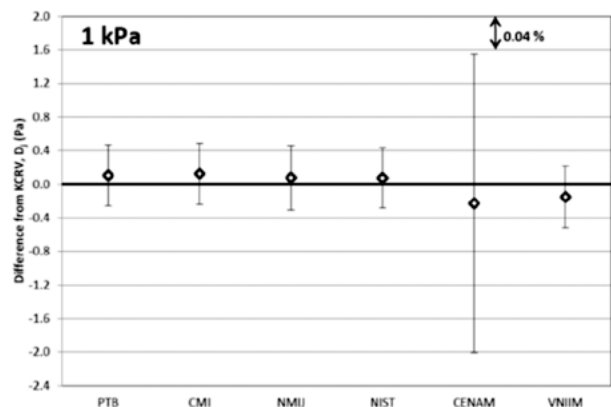


Рис. 2. Результаты сличений ССМ.Р-К4 для давления 1 000 Па [2]

Ось абсцисс: НМИ – участники сличений

Ось ординат: отклонение показаний НМИ от референтного значения

Участники сличений: PTB – Physikalische-Technische Bundesanstalt National Metrology Institute, Germany; CMI – Czech Metrology Institute; NMIJ – National Metrology Institute of Japan; NIST – National Institute of Standards and Technology, USA; CENAM – National Metrology Institute Mexico; VNIIM – ВНИИМ, Россия

Fig. 2. The results of the comparisons CCM.P-K4 for a pressure of 1 000 Pa [2]

Abscissa axis: NMI – participant of comparisons

Ordinate axis: deviation of NMI readings from the reference value

Comparison participants: PTB – Physikalische-Technische Bundesanstalt National Metrology Institute, Germany; CMI – Czech Metrology Institute; NMIJ – National Metrology Institute of Japan; NIST – National Institute of Standards and Technology, USA; CENAM – National Metrology Institute Mexico; VNIIM – D. I. Mendeleev Institute for Metrology, Russia

измеряется на эталоне плотности ВНИИМ, и измерения могут быть проведены для пробы масла, в которой обязательно будет присутствовать растворенный воздух, и только при атмосферном давлении. В рабочих же условиях масло находится под вакуумом и перед началом работы ЛИММ подвергается длительному процессу дегазации. Таким образом, совместное влияние факторов дегазации и снятия давления может привести к изменению значения плотности масла.

С целью оценки влияния этих факторов на значение плотности масла в 2017–18 гг. были проведены совместные исследования с РТВ (Германия) в рамках сотрудничества по теме КООМЕТ 724/RU-а/17². Результаты измерений дегазации с помощью плотномера осцилляционного типа (DMA 5000 M) приведены в табл. 1.

Приведенные в табл. 1 данные демонстрируют, что плотность масла в дегазированном состоянии на 0,059 кг/м³ больше, чем в газонасыщенном, что качественно согласуется, например, с результатами [7].

Плотность масла при снятии с него давления должна быть несколько меньше, чем при атмосферном давлении, вследствие сжимаемости жидкости:

$$\beta = -\left(\frac{1}{V}\right)\left(\frac{dV}{dp}\right)\frac{1}{V} = \left(\frac{1}{\rho}\right)\left(\frac{d\rho}{dp}\right), \quad (3)$$

где V – объем жидкости; ρ – плотность жидкости; p – давление; dV , $d\rho$, dp – их изменения.

Для исследования сжимаемости масла во ВНИИМ был разработан лазерный интерференционный пьезометр [8], позволяющий измерять сжимаемость масла в дегазированном

² КООМЕТ 724/RU-а/17 Исследование жидкостей манометров – первичные эталоны давления [сайт]. URL: <http://www.coomet.org/DB/isapi/isapi.dll>

Таблица 1. Результаты измерений дегазации плотномером осцилляционного типа (DMA 5000 M)

Table 1. Measurements results of degassing with an oscillating type densitometer (DMA 5000 M)

Состояние масла ВМ-1	Плотность масла при 20 °С, кг/м ³	Неопределенность, кг/м ³ ($k=2$)
Газонасыщенное	859,747	0,050
Дегазированное	859,806	0,050

состоянии и под вакуумом, т. е. в специфических рабочих условиях – в которых масло будет находиться в манометре при измерениях давления. В результате было получено значение сжимаемости масла ВМ-1 β , которое составило $(5,2 \pm 0,1) \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$. Это означает, что при изменении давления на одну атмосферу относительное изменение плотности масла $\Delta\rho/\rho$ составляет $5,2 \cdot 10^{-5}$.

Таким образом, очевидно, что эффекты дегазации и сжимаемости оказывают на плотность противоположное действие и практически равны по величине, поэтому не могут приводить к искажениям значения плотности масла, превышающим неопределенность измерения его плотности. Впоследствии при повторных измерениях плотности масла во ВНИИМ был получен результат, отличающийся от применяемого в сличениях, поэтому в дальнейшем необходим более тщательный контроль значения плотности рабочей жидкости ЛИММ. Так, например, в конструкции разрабатываемого в настоящее время в РТВ интерференционного лазерного масляного манометра предусмотрен встроенный денсиметр, позволяющий производить измерения плотности масла *in situ* непосредственно во время работы манометра [5].

Проблема разрешения ЛИММ

Ключевые сличения ССМ.Р-К4.2012 также показали, что в диапазоне 0,1–10 Па ЛИММ несколько уступает в точности эталонам NIST (США), РТВ (Германия), NMJ (Япония), что демонстрирует рис. 3 из [2]. Причина этого состоит именно в относительно невысоком разрешении манометра.

Указанное обстоятельство стимулировало работу по поиску способа повышения разрешения ЛИММ. В 2018–19 гг. во ВНИИМ был разработан метод, позволяющий на порядок

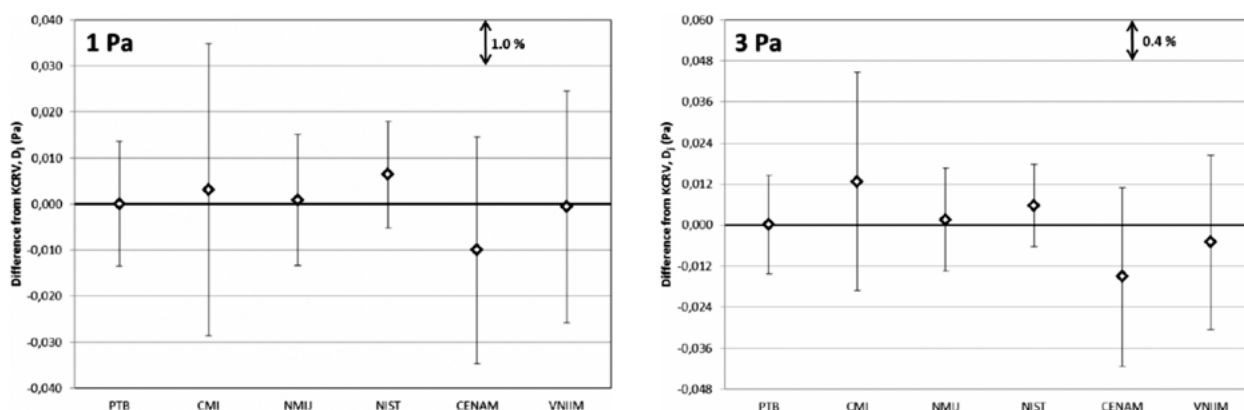


Рис. 3. Результаты сличений ССМ.Р-К4.2012 в точках 1 Па, 3 Па [2]

Ось абсцисс: НМИ – участники сличений

Ось ординат: отклонение показаний НМИ от референтного значения

Участники сличений: PTB – Physikalische-Technische Bundesanstalt National Metrology Institute, Germany; CMI – Czech Metrology Institute; NMIJ – National Metrology Institute of Japan; NIST – National Institute of Standards and Technology, USA; CENAM – National Metrology Institute Mexico; VNIIM – ВНИИМ, Россия

Fig. 3. The results of the comparisons CCM.P-K4.2012 at points 1 Pa, 3 Pa [2]

Abscissa axis: NMI – participant of comparisons

Ordinate axis: deviation of NMI readings from the reference value

Comparison participants: PTB – Physikalische-Technische Bundesanstalt National Metrology Institute, Germany; CMI – Czech Metrology Institute; NMIJ – National Metrology Institute of Japan; NIST – National Institute of Standards and Technology, USA; CENAM – National Metrology Institute Mexico; VNIIM – D. I. Mendeleev Institute for Metrology, Russia

увеличить разрешение манометра без внесения существенных изменений в его конструкцию. Идея описана в [9] и состоит в оснащении ЛИММ электронно-оптическим устройством фазовой модуляции, позволяющим производить отсчет при измерении интерференционного сигнала с разрешением $1/255$ доли интерференционной полосы. Был создан и исследован макет такого устройства (рис. 4).

Результаты исследований показали, что неопределенность измерения дробной доли полосы не превосходит $5/255$. Поскольку процедура измерений ЛИММ предполагает производить два таких отсчета (до и после напуска газа в манометр), результирующая неопределенность составит $1/25$ интерференционной полосы, что в 12 раз меньше разрешения существующего ЛИММ из состава ГЭТ 101-2011 и связанной с ним неопределенности.

В аналоге ЛИММ, разрабатываемом в настоящее время в РТВ (Германия), для измерения высоты столба жидкости применяется пара промышленных оптических интерферометров перемещений, имеющих разрешение

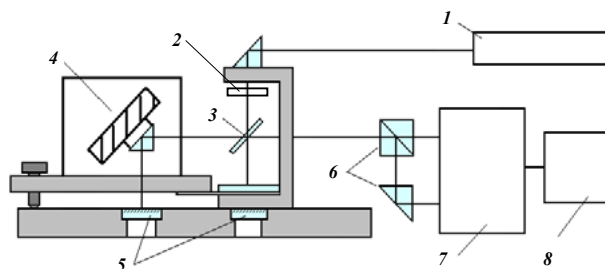


Рис. 4. Схема макета интерферометра для измерения дробных долей полосы:

- 1 – лазер; 2 – полуволновая фазовая пластина;
 - 3 – светоделительная полупрозрачная пластина;
 - 4 – пьезоактуатор с установленной на нем призмой полного отражения; 5 – плоские зеркала; 6 – поляризационный разделитель и отражающая призма;
 - 7 – электронный блок сопряжения с компьютером;
 - 8 – персональный компьютер
- Fig. 4. Diagram of the interferometer layout for measuring fractional unit of a stripe:
- 1 – laser; 2 – half-wave phase plate; 3 – beam splitting translucent plate; 4 – piezo actuator with a total reflection prism installed on it; 5 – plane mirrors;
 - 6 – polarization separator and reflecting prism;
 - 7 – electronic unit for interface with a computer;
 - 8 – personal computer

порядка 0,1 нм, что соответствует 0,002 интерференционной полосы. Однако исследования показывают, что интерференционный шум, вызванный волнами на поверхности масла, даже при использовании средств виброзащиты составляет порядка 5 нм [5], что по (1) соответствует 0,02 интерференционной полосы и сопоставимо с планируемыми параметрами ЛИММ.

Результаты и обсуждение

На основании представленного в статье анализа результатов измерения плотности масла в дегазированном состоянии и его сжимаемости сделан вывод о том, что введение поправки к значению его плотности, измеренной при нормальных условиях, не требуется. Выявлена необходимость более точного и регулярного контроля плотности масла.

В итоге определен возможный путь совершенствования ЛИММ: оснащение его электронно-оптическим устройством фазовой модуляции позволит увеличить разрешения манометра до 1/255 интерференционной полосы. В итоге это приведет к уменьшению постоянной части неопределенности измерений давления с помощью ЛИММ в диапазоне 0,1–10 Па в 10–12 раз, что при пересчете в единицы измерения давления составит порядка 0,1 мПа.

Заключение

Создание усовершенствованного ЛИММ, оснащенного оптическим интерференционным устройством с фазовой модуляцией, позволит привести возможности отечественной метрологии низкого абсолютного давления в области 0,1–1 000 Па к уровню лучших мировых эталонов в этом диапазоне измерений. В широком смысле это расширит перспективы развития технологий в данной области измерений, укрепит суверенитет Российской Федерации в области измерений низкого абсолютного давления, повысит авторитет ВНИИМ и российской метрологии в целом.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Новый Государственный первичный эталон единицы давления / И. В. Садковская [и др.] // Мир измерений. 2012. № 2(132). С. 19–25.
2. Final report on the key comparison CCM.P-K4.2012 in absolute pressure from 1 Pa to 10 kPa / J. Ricker [et al.] // Metrologia. 2017. Vol. 54. Tech. Suppl. 07002. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/54/1A/07002>

Благодарности: Автор выражает благодарность А. И. Эйхвальду и И. В. Садковской, сотрудникам научно-исследовательского отдела государственных эталонов в области измерений давления ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева», принимавшим участие в работах по совершенствованию Государственного первичного эталона единицы давления для области абсолютного давления в диапазоне $1 \cdot 10^{-1} \div 7 \cdot 10^5$ Па.

Acknowledgments: The author expresses gratitude to A. I. Eikhvald and I. V. Sadkovskaya, employees of the Research Department of State Measurement Standards in the field of Pressure Measurements of the D. I. Mendeleev Institute for Metrology, for their participation in the work on improving the State Primary Standard of the unit of pressure for the field of absolute pressure in the range $1 \cdot 10^{-1} \div 7 \cdot 10^5$ Pa.

Вклад автора: Автор подтверждает единичную ответственность за сбор данных, анализ и интерпретацию результатов, а также подготовку рукописи.

Contribution of the author: The author confirms sole responsibility for the following: data collection, analysis and interpretation of results, and manuscript preparation.

Конфликт интересов: Автор заявляет, что у него нет потенциального конфликта интересов в связи с исследованием, представленным в данной статье.

Conflict of interest: The author declares no conflict of interest.

Финансирование: Это исследование не получало финансовой поддержки в виде гранта от какой-либо организации государственного, коммерческого или некоммерческого сектора.

Funding: This research did not receive financial support in the form of a grant from any governmental, for-profit, or non-profit organizations.

3. Heydemann P. L. M., Tilford C. R., Hyland R. W. Ultrasonic manometers for low and medium vacua under development at the National Bureau of Standards // *Journal of Vacuum Science and Technology*. 1977. Vol. 14. P. 597–605. <https://doi.org/10.1116/1.569158>
4. A new primary standard oil manometer for absolute pressure up to 10 kPa / Y. Li [et al.] // *Metrologia*. 2015. Vol. 52, № 1. P. 111–120. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/52/1/111>
5. Sabuga W., Hashad A. S., Ehlers S. 2D flow model for calculating effective area of piston-cylinder units // *АСТА ИМЕКО*. 2020. Vol. 9, № 5. P. 319–324. https://doi.org/10.21014/acta_imeko.v9i5.992
6. 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>
7. Poulter K. F., Nash P. J. An interferometric oil micromanometer // *Journal of Physics E: Scientific Instruments*. 1979. Vol. 12, № 5. P. 931–936. <https://doi.org/10.1088/0022-3735/12/10/012>
8. Садковская И. В., Эйхвальд А. И., Эйхвальд Т. А. Измерение сжимаемости рабочей жидкости лазерного интерференционного масляного манометра с помощью интерференционного пьезометра низкого давления // *Измерительная техника*. 2018. № 5. С. 47–49.
9. Садковская И. В., Эйхвальд А. И., Эйхвальд Т. А. Исследование неопределенности измерений лазерного интерференционного масляного манометра высокого разрешения, вносимой оптическим интерферометром с фазовой модуляцией // *Приборы*. 2021. № 6 (252). С. 9–12.

REFERENCE

1. Sadkovskaya I. V., Cvelik V. A., Kovalkov V. P., Eikhvald A. I. New State primary standard of pressure unit. *Mir izmerenij*. 2012;2(132):19–25. (In Russ.).
2. Ricker J., Hendricks J., Bock Th., Dominik Pr., Kobata T., Torres J. et al. Final report on the key comparison CCM.P-K4.2012 in absolute pressure from 1 Pa to 10 kPa. *Metrologia*. 2017;54(Technical Supp 107002). <https://doi.org/10.1088/0026-1394/54/1A/07002>
3. Heydemann P. L. M., Tilford C. R., Hyland R. W. Ultrasonic manometers for low and medium vacua under development at the National Bureau of Standards. *Journal of Vacuum Science and Technology*. 1977;14:597–605. <https://doi.org/10.1116/1.569158>
4. Li Y., Yang Y., Wang J., Sun J. A new primary standard oil manometer for absolute pressure up to 10 kPa. *Metrologia*. 2015;52(1):111–120. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/52/1/111>
5. Sabuga W., Hashad A. S., Ehlers S. 2D flow model for calculating effective area of piston-cylinder units. *АСТА ИМЕКО*. 2020;9(5):319–324. https://doi.org/10.21014/acta_imeko.v9i5.992
6. Sadkovskaya I. V., Eikhval'd A. I., Eikhval'd T. A. Laser Interference Oil Manometer of State Primary Standard of the Unit of Pressure Get 101-2011. *Measurement Techniques*. 2019;(3):3–7. (In Russ.). <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2019-3-3-7>
7. Poulter K. F., Nash P. J. An interferometric oil micromanometer. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*. 1979;12(5):931–936. <https://doi.org/10.1088/0022-3735/12/10/012>
8. Sadkovskaya I. V., Eikhval'd T. A., Eikhval'd A. I. Measurements of the compressibility of working liquid of a laser interferometric oil manometer with the help of a low-pressure interferometric piezometer. *Measurement Techniques*. 2018;5:47–49. (In Russ.). <https://doi.org/10.1007/s11018-018-1455-9>
9. Sadkovskaya I. V., Eikhval'd T. A., Eikhval'd A. I. Investigation of the measurement uncertainty of a high-resolution laser interference oil pressure gauge introduced by a phase-modulated optical interferometer. *Pribory*. 2021;6:9–12. (In Russ.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Эйхвальд Татьяна Алексеевна – инженер научно-исследовательского отдела государственных эталонов в области измерений давления ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»
190005, Россия, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 19
e-mail: eichwald@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Tatiana A. Eikhvald – Engineer, Research 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: eichwald@mail.ru