

## ЭТАЛОНЫ

Обзорная статья

УДК 536.5.081.3//535.241.34

<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2023-19-5-35-44>



# 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

И. В. Садковская ✉, А. И. Эйхвальд, Т. А. Эйхвальд

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева», г. Санкт-Петербург, Россия  
✉ I. V. Sadkovskaya@vniim.ru

**Аннотация:** Рассмотрены вопросы, связанные с созданием и совершенствованием системы метрологического обеспечения РФ в области абсолютного давления, обозначены основные этапы и результаты теоретических и практических научно-исследовательских работ в области измерений абсолютного давления, проводимых в ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева». В сжатом виде приведены исторические сведения о создании первичных эталонов и поверочных схем в области измерения давления. Проведен краткий анализ состояния и тенденций развития мировой метрологии в области измерения абсолютного давления, основанный на литературных данных и результатах ключевых сличений. Изложены причины, обуславливающие необходимость совершенствования Государственного первичного эталона единицы давления для области абсолютного давления, предложены пути осуществления модернизации эталона. Описаны принципы действия и особенности конструкций эталонных комплексов из состава Государственного первичного эталона единицы абсолютного давления ГЭТ 101–2011. Перечислены основные метрологические характеристики эталона, опубликованы итоги ключевых сличений, результаты исследований эталона и международного сотрудничества. Изложены и проанализированы существующие проблемы эталонной базы РФ в области абсолютного давления и пути дальнейшего совершенствования первичного эталона. Дана оценка метрологических характеристик Государственного первичного эталона единицы абсолютного давления после окончания работ по его модернизации.

**Ключевые слова:** метрологическое обеспечение, абсолютное давление, единство измерений, Государственный первичный эталон, лазерный интерференционный жидкостный манометр, фазовая модуляция, грузопоршневой манометр, метрологические характеристики, ключевые сличения

**Используемые сокращения:** ВЭ – вторичный эталон; ГПС – Государственная поверочная схема; ГПМ – грузопоршневой манометр; ГПЭ – Государственный первичный эталон; ГЭТ 101 – Государственный первичный эталон единицы давления для области абсолютного давления в диапазоне  $1 \cdot 10^{-1} - 7 \cdot 10^5$  Па; СИ – средство измерений; ЛИММ – лазерный интерференционный масляный манометр; ЛИРМ – лазерный интерференционный ртутный манометр.

**Ссылка при цитировании:** 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>

Статья поступила в редакцию 15.07.2023; одобрена после рецензирования 26.10.2023; принята к публикации 25.12.2023.

## MEASUREMENT STANDARDS

Review Article

# 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

Irina V. Sadkovskaya ✉, Aleksei I. Eikhvald, Tatiana A. Eikhvald

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

✉ I. V. Sadkovskaya@vniim.ru

**Abstract:** Issues related to the development and improvement of the metrological support system of the Russian Federation in the field of absolute pressure are considered; the main stages and results of theoretical and practical research work in the field of absolute pressure measurements carried out at the D. I. Mendeleev Institute for Metrology are outlined. Historical information on the creation of primary standards and verification schedules in the field of pressure measurement is presented. A brief analysis of the state and development trends of world metrology in the field of absolute pressure measurement is carried out based on literature data and the results of key comparisons. The reasons for improving the State Primary Standard of the pressure unit in the field of absolute pressure are outlined, and ways to modernize the standard are proposed. The operating principles and design features of reference complexes from the State Primary Standard for the pressure unit in the field of absolute pressure GET 101–2011 are described. The main metrological characteristics of the standard are listed; the results of key comparisons, benchmark studies and international cooperation are published. The existing problems of the reference base of the Russian Federation in the field of absolute pressure and ways to improve the primary standard are outlined and analyzed. The metrological characteristics of the State Primary Standard for the pressure unit in the field of absolute pressure after completion of the modernization are assessed.

**Keywords:** metrological support, absolute pressure, uniformity of measurements, State Primary Standard, laser interference liquid-level manometer, phase modulation, deadweight manometer, metrological characteristics, key comparisons

**For citation:** 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>.

The article was submitted 15.07.2023; approved after reviewing 26.10.2023; accepted for publication 25.12.2023.

### Введение

Роль метрологии в жизни современного общества невозможно переоценить, понятие точности измерений используется во всех технических и естественных науках. Единство измерений осуществляется путем централизации воспроизведения единицы физической величины с помощью первичного эталона, воспроизводящего единицу с наивысшей точностью, возможной в данной области измерений, и возглавляющего ГПС для СИ в данной области. Растущие потребности и запросы развивающейся науки, техники и новых технологий диктуют необходимость постоянного совершенствования системы

метрологического обеспечения в различных областях измерений. В данной статье рассматриваются вопросы, связанные с системой метрологического обеспечения в РФ в области измерений абсолютного давления.

### Экскурс

Первый эталон в РФ, воспроизводящий и хранящий единицу давления, был создан в 1920-х гг. в Главной Палате мер и весов по идее Д. И. Менделеева и представлял собой многоканальный ртутный манометр. В 1925 г. в стране была введена обязательная поверка приборов давления (манометров, вакуумметров,

мановакуумметров). Число поверяемых приборов возросло из года в год и достигло к 1939–1941 гг. только по вновь изготовленным приборам почти одного миллиона [1]. К этому времени была сформирована первая поверочная схема в области измерения давления, которую возглавил введенный к тому времени в действие эталонный ртутный мановакуумметр.

Развитие эталонной базы РФ в области давления привело к созданию в 1970-х гг. пяти государственных (первичных и первичных специальных) эталонов: двух – для области низкого и среднего абсолютного давления, двух – для области избыточного давления, одного – для разности давлений. Четыре из пяти эталонов были созданы и находятся в ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» (ВНИИМ). Государственный первичный эталон в области средних абсолютных давлений ГЭТ 101–76 был представлен двумя грузопоршневыми манометрами абсолютного давления и обеспечивал воспроизведение единицы давления в диапазоне  $2,7 \cdot 10^2 - 1300 \cdot 10^2$  Па [2]. Калибровочные возможности эталона, опубликованные на сайте МБМВ<sup>1</sup> в 2001 г., составляли 6,7 Па (Calibration and Measurement Capabilities. Mass and related quantities), чего к началу XXI века было явно недостаточно для метрологического обеспечения новых прецизионных СИ абсолютного давления, используемых в различных отраслях экономики РФ: их заявленные погрешности составляли десятые и даже сотые доли Па.

Для выбора направления работ по совершенствованию эталона ГЭТ 101–76, которые проводились в 2008–2011 гг., был проведен анализ состояния и тенденций развития мировой метрологии в области измерения низкого и среднего абсолютного давления, проведенный на основе литературных данных и результатов ключевых сличений, который позволил утверждать следующее.

Применение интерферометрических методов в жидкостной манометрии, начавшееся еще в 1960-х гг. в США, Франции [3–4] и других странах, привело к существенному повышению точности воспроизведения единицы давления и сделало жидкостные манометры самыми точными первичными эталонами давления в диапазоне до 1 атм. В 1970-е гг. были созданы такие приборы, как лазерный интерференционный масляный манометр

для низких давлений в NPL (Великобритания) [5], лазерный интерференционный ртутный манометр в CSIRO (Австралия) [6], комплекс из масляного и ртутного ультразвуковых манометров в NIST (США) [7], являющийся и сегодня самым точным первичным эталоном в мире. Проведенные в 2002 и 2008 гг. ключевые сличения первичных эталонов в области низкого (до 1000 Па) [8] и среднего (до 120 кПа) [9] давления убедительно продемонстрировали роль интерференционных жидкостных манометров в современной метрологии. Поэтому основной задачей при совершенствовании эталонной базы РФ в области измерения абсолютного давления явилась разработка фактически нового первичного эталона единицы давления на основе лазерных интерференционных жидкостных манометров. В состав усовершенствованного и утвержденного в 2012 г. эталона ГЭТ 101–2011 вошли ЛИММ и ЛИРМ, разработанные во ВНИИМ, и ГПМ с газовой смазкой [10].

Проводимые в соответствии с различными темами и программами (в том числе международными) исследования эталона ГЭТ 101–2011 позволили за прошедшие после его утверждения 10 лет наметить реальные и конкретные пути его дальнейшего совершенствования.

### **Дискурс**

Приведенные ниже основные причины обосновывают необходимость модернизации эталона.

С 1 января 2020 года введена в действие новая ГПС для средств измерений абсолютного давления, возглавляемая эталоном ГЭТ 101–2011. Диапазон действия ГПС расширен на порядок в областях как низкого, так и высокого давления по сравнению с ранее действующей поверочной схемой и составляет в настоящее время  $1 \cdot 10^{-1} - 1 \cdot 10^7$  Па (8 порядков по значению давления). В соответствии с ГПС передача единицы давления рабочим эталонам и средствам измерений от ГПЭ предусмотрена, в основном, посредством разряда ВЭ. Создание комплекса этих эталонов до настоящего времени не завершено: ВЭ отсутствует в диапазоне свыше  $1,3 \cdot 10^3$  Па, поэтому передача единицы давления рабочим эталонам производится непосредственно от ГЭТ 101–2011. Постоянная эксплуатация ГПМ из состава ГЭТ 101 привела к тому, что к настоящему времени ГПМ выработал свой ресурс и требует незамедлительной модернизации. Кроме модернизации ГПМ необходимо усовершенствовать процесс передачи единицы давления от ГПЭ к рабочим эталонам, применяя для этой цели высокоточное средство передачи – вторичный эталон – и снизив рабочую нагрузку на ГПЭ.

Другим важным направлением совершенствования эталона ГЭТ 101 является разработка и введение в его

<sup>1</sup> МБМВ (Международное бюро мер и весов, фр. Bureau International des Poids et Mesures, BIPM) хранит международные эталоны основных единиц; выполняет международные метрологические работы, связанные с разработкой и хранением международных эталонов, сличением национальных эталонов с международными и между собой; проводит исследования в области метрологии, направленные на увеличение точности измерений.

состав ЛИММ высокого разрешения. В настоящее время ЛИММ с диапазоном измерений  $1 \cdot 10^{-1} - 1 \cdot 10^3$  Па имеет разрешение 1,4 МПа, что связано с применяемым методом регистрации интерференционного сигнала – счетом полуполос. Из-за относительно невысокого разрешения лазерного интерферометра ЛИММ уступает в точности ультразвуковому интерференционному манометру NIST<sup>2</sup> [11] в нижней части диапазона. Увеличение разрешения оптического интерферометрического устройства ЛИММ до сотых долей интерференционной полосы за счет изменения конструкции интерферометра и электронной схемы обработки сигнала позволит повысить точность воспроизведения единицы абсолютного давления ЛИММ в нижней части диапазона (ниже 10 Па) в несколько раз. При этом диапазон ГПЭ будет расширен в область более низких давлений.

### **Актуальность**

Актуальность разработки ЛИММ высокого разрешения подтверждает тот факт, что в мировой метрологии не ослабевает интерес к созданию первичных эталонов давления на основе интерференционных жидкостных манометров. Так, в 2015 г. в NIM<sup>3</sup> был создан ультразвуковой интерференционный масляный манометр [12], а в PTB<sup>4</sup> продолжается разработка лазерного интерференционного масляного манометра [13].

Начатые в 2021 г. работы по очередному совершенствованию ГПЭ отвечают требованиям распоряжения Правительства РФ от 19 апреля 2017 года № 737-р, в котором отмечается, что по ряду областей измерений (в том числе давления) РФ отстает от уровня ведущих стран мира (раздел III, п. 3) и приводится информация о периодичности обновления национальных эталонов передовых государств, которая составляет сегодня 5–7 лет.

Таким образом, цель данного исследования – на основе литературных данных и результатов ключевых сличений проанализировать основные факторы, влияющие на метрологическое обеспечение в области измерения абсолютного давления. По результатам анализа предлагается сформулировать комплекс мероприятий, направленных на расширение функциональных возможностей ГПЭ. В задачи исследования входило рассмотреть варианты решения проблемы метрологического обеспечения высокоточных СИ, особенно зарубежного

производства, которые стали широко применяться в атомной энергетике, авиакосмическом комплексе, металлургии, электронной и медицинской промышленности, то есть по основным направлениям технологической модернизации экономики РФ.

### **Материалы и методы**

*Состав, принцип действия, метрологические характеристики эталона ГЭТ 101–2011*

В настоящее время первичный эталон ГЭТ 101–2011 [10] состоит из трех эталонных комплексов: 1) лазерного интерференционного масляного манометра (ЛИММ); 2) лазерного интерференционного ртутного манометра (ЛИРМ); 3) грузопоршневого манометра (ГПМ) с газовой смазкой. ЛИММ и ЛИРМ являются отечественными разработками, их конструкции защищены патентами РФ RU2262677 C1 и RU2559163 C1.

ГЭТ 101–2011 возглавляет Государственную поверочную схему для средств измерений абсолютного давления в диапазоне  $1 \cdot 10^{-1} - 1 \cdot 10^7$  Па, утвержденную приказом Росстандарта от 6 декабря 2019 года № 2900.

Эталон необходим для метрологического обеспечения высокоточных СИ, применяемых в атомной энергетике, авиакосмическом комплексе, металлургии, электронной и медицинской промышленности, в системах Росгидромета и Минобороны РФ, в приборостроении и точном машиностроении, а также для обеспечения международной эквивалентности измерительных возможностей РФ в области абсолютного давления.

### **Лазерные интерференционные жидкостные манометры ЛИММ и ЛИРМ**

В основе принципа действия жидкостных манометров лежат законы гидростатики, из которых следует, что давление газа уравнивает столб жидкости в U-образной манометрической трубке. Поэтому измеряемое давление газа может быть выражено через плотность жидкости, ускорение свободного падения и высоту столба жидкости, которая для достижения высшей точности измеряется лазерно-интерференционным методом.

Лазерные интерференционные масляный [14] и ртутный [15] манометры имеют сходную структуру (рис. 1). Основные составные части манометров: корпус (U-образная трубка) с рабочей жидкостью и поплавковыми демпфирующими устройствами, оптический интерферометр, газовый лазер, электронный блок сопряжения с компьютером (оптико-электронная схема регистрации), управляющий компьютер, система создания и поддержания абсолютного давления.

<sup>2</sup> NIST – National Institute of Standards and Technology, USA.

<sup>3</sup> NIM – National Institute of Metrology of China, China.

<sup>4</sup> PTB – Physikalisch-Technische Bundesanstalt National Metrology Institute, Germany.

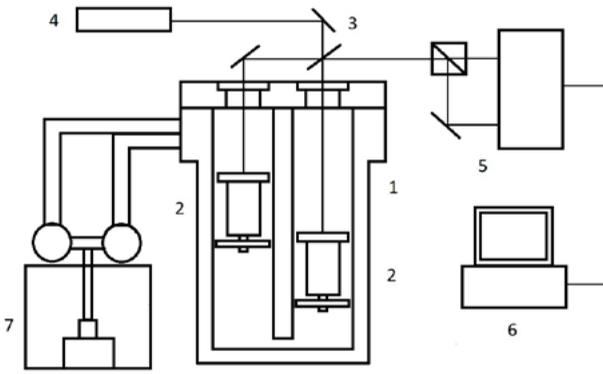


Рис. 1. Схема лазерного интерференционного жидкостно-го манометра: 1 – корпус (U-образная трубка) с рабочей жидкостью; 2 – поплавковые демпфирующие устройства; 3 – оптический интерферометр; 4 – газовый лазер; 5 – электронный блок сопряжения с компьютером (оптико-электронная схема регистрации); 6 – управляющий компьютер; 7 – система создания и поддержания абсолютного давления

Fig. 1. Diagram of laser interference liquid-level manometer: 1 – housing (U-shaped tube) with working fluid; 2 – float damping devices; 3 – optical interferometer; 4 – gas laser; 5 – electronic interface unit with a computer (optical-electronic registration circuit); 6 – control computer; 7 – system for creating and maintaining absolute pressure

Уравнение измерения лазерного интерференционного жидкостного манометра имеет вид:

$$p = \rho \cdot g \cdot h + p_0, \quad (1)$$

где  $p$  – измеряемое давление;  $p_0$  – остаточное давление в колене сравнения манометра;  $\rho$  – плотность рабочей жидкости,  $\rho(t) = \rho_0 [1 - \beta(t - t_0)]$ , где  $\beta$  – температурный коэффициент плотности;  $\rho_0$  – плотность, измеренная при температуре  $t_0 = 20,0$  °C;  $g$  – местное значение ускорения свободного падения;  $h$  – разность уровней жидкости в коленах манометра, при этом выражение для  $h$  имеет вид:

для ЛИММ:

$$h = \frac{N \cdot \lambda}{4 \cdot \cos \alpha}, \quad (2)$$

для ЛИРМ:

$$h = \frac{-(1 + aH) + \sqrt{(1 + aH)^2 + a \cdot \frac{N\lambda}{2}}}{a \cdot \cos \alpha}, \quad (3)$$

где  $N$  – количество сосчитанных интерференционных полуполос;  $\lambda$  – длина волны лазера;  $\alpha$  – угол падения лазерных лучей на поверхность жидкости в манометре;  $H$  – расстояние от поверхностей ртути до оптических

оков в обоих коленах в откачанном манометре;  $a$  – коэффициент, связанный с показателем преломления газа.

Отличительной особенностью ЛИММ и ЛИРМ являются оригинальные конструкции их поплавковых демпфирующих устройств [14–15], которые применяются в манометрах с целью уменьшения поверхностных волн рабочей жидкости. Кроме демпфирования поверхностных волн поплавки выполняют еще одну важную роль – стабилизация кривизны поверхности жидкости, что уменьшает случайную погрешность измерений давления [14].

### Грузопоршневой манометр

Принцип действия ГПМ заключается в уравновешивании силы давления газа на неуплотненный поршень весом поршня с грузоприемным устройством и наложенными на него грузами известной массы. Измеряемое давление газа может быть выражено через массу подвижной части и грузов, приведенную площадь поршня и ускорение свободного падения.

Автоматизированный ГПМ абсолютного давления с газовой смазкой Ruska 2465 представляет собой измерительную систему, в которую входят измерительный прибор и автоматический генератор давления (контроллер), обеспечивающий автоматическое задание и поддержание требуемого значения давления после наложения вручную требуемой комбинации грузов на поршень измерительного прибора.

Уравнение измерения абсолютного давления грузопоршневым манометром имеет вид:

$$p_{a_i} = \frac{m_i g}{A(1 + \alpha(t_i - t_n))} + p_o, \quad (4)$$

где  $p_{a_i}$  – измеряемое абсолютное давление;  $m_i$  – масса подвижной части и грузов, наложенных на поршень;  $g$  – местное значение ускорения свободного падения;  $A$  – приведенная площадь измерительной поршневой системы;  $\alpha$  – температурный коэффициент линейного расширения материала измерительной поршневой системы;  $t_i$  – температура измерительной поршневой системы;  $t_n$  – нормальная температура;  $t_n = 20,0$  °C;  $p_o$  – остаточное давление.

### Метрологические характеристики эталона ГЭТ 101–2011

В соответствии с разработанными программами и методиками исследований были определены основные метрологические характеристики ЛИММ, ЛИРМ и ГПМ (табл. 1). ГПЭ воспроизводит и хранит единицу давления в диапазоне  $1 \cdot 10^{-1} - 7 \cdot 10^5$  Па.

Метрологические характеристики эталона ГЭТ 101–2011 соответствуют характеристикам лучших зарубежных эталонов NIST (США), PTB (Германия), NMIJ (Япония), действующих в аналогичных диапазонах.

### Сличения. Международное сотрудничество. Исследования ГПЭ

В 2010 г. ЛИММ участвовал в сличениях с национальными эталонами Центра Метрологии и Аккредитации Финляндии<sup>5</sup> в диапазоне 1–1000 Па, проект EURAMET № 1151, и подтвердил свои метрологические характеристики [16]. Наличие в составе эталона ГЭТ 101–2011 отечественных лазерных интерференционных жидкостных манометров, высокий научно-технический уровень которых соответствует лучшим мировым образцам, сделал возможным участие эталона в ключевых сличениях ССМ.Р-К4.2012 в диапазоне абсолютно го давления 1–10<sup>4</sup> Па [11]. Положительный итог участия ЛИММ и ЛИРМ в ключевых сличениях позволил ВНИИМ в 2018 г. актуализировать калибровочные и измерительные возможности РФ в области абсолютно го давления. Количество строк СМС, зарегистрированных в базе МБМВ, увеличилось на две за счет внесения в нее калибровочных и измерительных возможностей, реализуемых разработанными во ВНИИМ жидкостными манометрами.

В соответствии с Программой сотрудничества между Росстандартом и PTB, с 2015 г. ведутся работы в области разработки, исследования и сличения лазерных интерференционных масляных манометров, используемых в качестве первичных эталонов абсолютно го давления. Совместно с PTB в рамках сотрудничества по теме КООМЕТ 724/RU-a/17 проведены исследования физико-химических свойств рабочей жидкости ЛИММ (масла вакуумного VM-1). Результаты исследований позволяют утверждать, что влияние дегазации и понижения

давления на плотность масла практически компенсируют друг друга, их совместное воздействие приводит к незначительному изменению плотности, которое составляет  $\sim 1 \cdot 10^{-5}$ , и введения поправок к плотности масла VM-1, связанных с эффектами дегазации и сжимаемости, не требуется [17].

Проведены исследования возможности повышения разрешения ЛИММ. С этой целью во ВНИИМ разработано и опробовано оптическое интерференционное устройство с фазовой модуляцией, позволяющее измерять 1/255 долю интерференционной полосы. Проведенные исследования его функциональности дают возможность утверждать, что неопределенность отсчета дробной доли полосы не превосходит 5/255. При этом результирующая неопределенность не превосходит 1/25 интерференционной полосы (в пересчете в давление – 0,2 мПа), что в 7 раз меньше разрешения ЛИММ и связанной с ним неопределенности [18]. Полученные результаты исследований позволили сделать вывод о целесообразности разработки ЛИММ высокого разрешения для совершенствования ГЭТ 101–2011.

### Результаты и обсуждение

#### Пути совершенствования эталона ГЭТ 101–2011

В рамках работ по совершенствованию эталона ГЭТ 101 планируется введение в его состав нового отечественного ГПМ с 4 измерительными поршневыми системами (ИПС), что позволит увеличить верхнюю границу диапазона воспроизведения единицы давления эталоном до 10<sup>7</sup> Па. С этой целью в ООО «Альфаскаль» в соответствии с разработанным ТЗ был изготовлен грузопоршневой манометр абсолютно го давления МПА, который должен заменить ГПМ из состава ГЭТ 101–2011. Основные узлы МПА: измерительная поршневая система (ИПС); основное устройство; комплект грузов; устройство создания и поддержания давления (УСД). Запланированы исследования основных метрологических и технических характеристик МПА с ИПС МГП-0,2, МГП-2, МГП-10

<sup>5</sup> MIKES – Centre for Metrology and Accreditation, Finland.

Таблица 1. Метрологические характеристики ГЭТ 101–2011  
Table 1. Metrological characteristics of GET 101–2011

Эталонный комплекс	Диапазон значений давления, Па	Среднее квадратическое отклонение результата измерений $S$ , Па	Неисключенная систематическая погрешность $\theta$ , Па	Суммарная стандартная неопределенность $u_c$ , Па
ЛИММ	$1 \cdot 10^{-1} - 1 \cdot 10^3$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-3} + 7,0 \cdot 10^{-5} \cdot p^*$	$3,6 \cdot 10^{-3} + 5,0 \cdot 10^{-5} \cdot p^*$
ЛИРМ	$1 \cdot 10^2 - 1,3 \cdot 10^5$	$2,1 \cdot 10^{-2}$	$4,3 \cdot 10^{-2} + 7,0 \cdot 10^{-6} \cdot p^*$	$5,2 \cdot 10^{-2} + 4,9 \cdot 10^{-6} \cdot p^*$
ГПМ	$7 \cdot 10^3 - 7 \cdot 10^5$	0,2–1	0,3–7	0,5–7,8

\* Примечание:  $p$  – измеряемое давление, Па.

и МГП-100, включающие следующие процедуры: определение продолжительности свободного вращения и скорости опускания поршня ИПС; измерение геометрических параметров поршня и цилиндра; калибровку комплекта специальных грузов, датчиков температуры и остаточного давления МПА; проведение сличений всех четырех ИПС в перекрывающихся поддиапазонах с целью определения метрологических характеристик МПА во всем диапазоне измерений – от  $7 \cdot 10^2$  до  $10^7$  Па.

В усовершенствованном ГПЭ в качестве средства передачи единицы давления рабочим эталонам и высокоточным СИ предполагается использовать калибратор давления PACE1000 с модулями улучшенной и повышенной точности – IRS1-B и IRS2-B (Рег. № 72120–18 в ФИФ ОЕИ). Введение в состав ГПЭ стабильного, прецизионного, транспортируемого СИ давления позволит снизить нагрузку на ГПЭ и упростить процесс передачи единицы давления рабочим эталонам в соответствии с ГПС. Кроме того, транспортируемое СИ сможет использоваться в качестве эталона сравнения при проведении сличений.

С целью создания эталонной установки на основе ЛИММ высокого разрешения (ЛИММ-2) в ООО «Альфапаскаль» в соответствии с разработанным техническим заданием начаты работы по изготовлению корпуса манометра – одного из основных узлов ЛИММ-2. Разработка ЛИММ высокого разрешения предполагает также модернизацию поплавковых демпфирующих устройств и разработку новой системы создания и поддержания низкого абсолютного давления. Проведение пуско-наладочных работ и испытаний эталонной установки ЛИММ-2 в сборе запланировано после изготовления и поставки во ВНИИМ всех ее составных частей.

Введение ЛИММ-2 в состав ГПЭ позволит в несколько раз повысить точность воспроизведения единицы давления в нижней части диапазона (ниже 10 Па) и снизить нижний предел измерений эталона до  $1 \cdot 10^{-2}$  Па (в настоящее время –  $1 \cdot 10^{-1}$  Па).

### Заключение

Система метрологического обеспечения в области измерений абсолютного давления должна постоянно совершенствоваться в связи с растущими потребностями и запросами отечественной науки и техники. Обеспечение единства измерений в области давления невозможно без совершенствования эталонной базы страны, и, в первую очередь, – Государственного первичного эталона РФ. Намеченные сегодня пути совершенствования эталона ГЭТ 101 являются результатом

постоянно проводимых в научно-исследовательском отделе государственных эталонов в области измерений давления ВНИИМ метрологических исследований, анализа и оценки состояния входящих в его состав эталонных установок.

По завершении всего объема работ во ВНИИМ должен быть создан и утвержден в качестве усовершенствованного ГПЭ единицы абсолютного давления эталонный комплекс, в состав которого будут входить следующие эталонные установки:

- лазерный интерференционный масляный манометр высокого разрешения (ЛИММ-2), диапазон измерений от  $1 \cdot 10^{-2}$  до  $1 \cdot 10^2$  Па;
- лазерный интерференционный масляный манометр (ЛИММ-1), диапазон измерений от  $1 \cdot 10^{-1}$  до  $1 \cdot 10^3$  Па;
- лазерный интерференционный ртутный манометр (ЛИРМ), диапазон измерений от  $1 \cdot 10^2$  до  $1 \cdot 10^5$  Па;
- грузопоршневой манометр абсолютного давления МПА с 4-мя измерительными поршневыми системами, диапазон измерений от  $7 \cdot 10^2$  до  $1 \cdot 10^7$  Па;
- калибратор давления PACE1000 с 2-мя модулями (улучшенной и повышенной точности) – средство передачи единицы давления в диапазоне от  $3,5 \cdot 10^3$  до  $3,5 \cdot 10^5$  Па.

Введение в действие усовершенствованного ГПЭ позволит:

- а) снизить нижний предел измерений абсолютного давления эталона до  $1 \cdot 10^{-2}$  Па (в настоящее время –  $1 \cdot 10^{-1}$  Па);
- б) повысить точность воспроизведения единицы абсолютного давления в нижней части диапазона ГПЭ (ниже 10 Па) в 2–3 раза;
- в) повысить верхний предел измерений абсолютного давления до  $1 \cdot 10^7$  (в настоящее время –  $7 \cdot 10^5$  Па);
- г) усовершенствовать процесс передачи единицы давления рабочим эталонам, применяя для этой цели специальное средство передачи единицы давления;
- д) разработать обновленную Государственную поверочную схему (ГПС) для СИ абсолютного давления в диапазоне  $1 \cdot 10^{-2}$  –  $1 \cdot 10^8$  Па.

Таким образом, комплекс мероприятий по совершенствованию ГПЭ направлен на расширение его функциональных возможностей, включая повышение точности, расширение диапазона воспроизведения единицы абсолютного давления и совершенствование процесса передачи единицы давления вторичным и рабочим эталонам в соответствии с обновленной ГПС.

Достигнутые в результате совершенствования ГПЭ результаты позволяют обеспечить потребности научных

исследований и промышленности страны в повышении точности измерений абсолютного давления в широком диапазоне. Совершенствование эталона позволит решить проблемы метрологического обеспечения высокоточных СИ, особенно зарубежного производства, которые стали широко применяться в атомной энергетике, авиакосмическом комплексе, металлургии, электронной и медицинской промышленности, то есть по основным направлениям технологической модернизации экономики России.

**Благодарности:** Работы по совершенствованию и содержанию Государственного первичного эталона единицы давления для области абсолютного давления ГЭТ 101 проводились и проводятся в соответствии с соглашениями между Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии (Росстандартом) и ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» о предоставлении субсидий из федерального бюджета на осуществление расходов в области обеспечения единства измерений «Разработка, совершенствование, содержание Государственных первичных эталонов единиц величин, а также разработка и совершенствование Государственных первичных референтных методик (методов) измерений».

**Acknowledgments:** Work to improve and maintain the State Primary Standard for the pressure unit in the field of absolute pressure GET 101 was and is being carried out in accordance with agreements between the Federal Agency

for Technical Regulation and Metrology (Rosstandart) and the D. I. Mendeleev Institute for Metrology on the provision of subsidies from the federal budget for expenses in the field of ensuring the uniformity of measurements “Development, improvement, maintenance of State primary measurement standards of quantity units, as well as development and improvement of State primary reference measurement techniques (methods).”

**Вклад соавторов:** Садковская И. В. – определение замысла статьи, работа с литературными данными, подготовка первоначального варианта и доработка текста статьи; Эйхвальд Т. А. – работа с литературными данными, доработка текста статьи; Эйхвальд А. И. – формирование концепции работы, критический анализ материалов статьи.

**Author contributions:** Sadkovskaya I. V. – definition of the article idea, work with literary data, preparation of the initial version and revision of the text; Eikhvald T. A. – work with literary data, revision of the text; Eikhvald A. I. – development of the research concept, critical analysis of the article materials.

**Конфликт интересов:** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с содержанием настоящей статьи.

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

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сто лет государственной службы мер и весов в СССР / Б. М. Леонов [и др.]. Москва; Ленинград: Гос. изд-во техн.-теорет. лит-ры, 1945. 376 с.
2. Полухин Г. И., Цвелик В. А. Государственный специальный эталон и общесоюзная поверочная схема для средств измерений абсолютного давления в диапазоне  $2,7 \cdot 10^2 - 4000 \cdot 10^2$  Па // Измерительная техника. 1977. № 6. С. 5–6.
3. Thomas A. M., Johnson D. P., Little J. W. Design of an interferometric oil manometer for vacuum measurement // Transactions the ninth national vacuum symposium, American vacuum society. 1962. P. 468–473.
4. Aubry B., Delbart R. Manometre differential interferometrique systeme Peube // Le Vide. 1965. Vol. 20, № 117. P. 194–199.
5. Poulter K. F., Nash P. J. An interferometric oil micromanometer // Journal of Physics E: Scientific Instruments. 1979. Vol. 12. P. 931–936.
6. A new interferometric manometer / E. R. Harrison [et al.] // Metrologia. 1976. Vol. 12. P. 115–122.
7. Heydemann P. L. M., Tilford C. R., Hyland R. W. Ultrasonic manometers for low and medium vacuum under development at the National Bureau of Standards // Journal of Vacuum Science & Technology A. 1977. Vol. 14(1). P. 597–605.
8. Final report on key comparison CCM.P-K4 in absolute pressure from 1 Pa to 1 000 Pa / A. P. Miiller [et al.] // Metrologia. 2002. Vol. 39. Tech. Suppl. 07001.
9. Final report on key comparison CCM.P-K2. Pressure (10 kPa to 120 kPa). Absolute Mode / M. Perkin [et al.] // Metrologia. 2008. Vol. 45. Tech. Suppl. 07002. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/45/1A/07002>
10. Новый Государственный первичный эталон единицы давления / И. В. Садковская [и др.] // Мир измерений. 2012. № 2. С. 19–25.
11. 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>
12. A new primary standard oil manometer for absolute pressure up to 10 kPa / Li Yanhua [et al.] // Metrologia. 2015. Vol. 52. P. 111–120. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/52/1/111>
13. Ehlers S., Sabuga W. Progress in development of an interferometric oil manometer // ACTA IMEKO. 2020. Vol. 9. № 5. P. 334–337. [https://doi.org/10.21014/acta\\_imeko.v9i5.995](https://doi.org/10.21014/acta_imeko.v9i5.995)

14. Садковская И. В., Эйхвальд А. И., Эйхвальд Т. А. Лазерный интерференционный масляный манометр // Измерительная техника. 2019. 3. С. 3–7. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2019-3-3-7>
15. Садковская И. В., Эйхвальд А. И. Лазерный интерференционный ртутный манометр государственного первичного эталона единицы давления ГЭТ 101-2011 // Измерительная техника. 2014. № 11. С. 11–14.
16. Садковская И. В., Эйхвальд А. И., Rantanen M., Semenoja S. Результаты сличений лазерного интерференционного масляного манометра с национальными эталонами Финляндии // Измерительная техника. 2011. № 5. С. 66–70.
17. Садковская И. В., Эйхвальд А. И., Эйхвальд Т. А. Измерение сжимаемости рабочей жидкости лазерного интерференционного масляного вакуумметра с помощью интерференционного пьезометра низкого давления // Измерительная техника. 2018. № 5. С. 47–49.
18. 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. С. 9–12.

## REFERENCE

1. Leonov B. M., Malikov S. F. et al. One hundred years of public service of weights and measures in the USSR. Moscow; Leningrad: Gosudarstvennoe izdatel'stvo tehnicheckoj-teoreticheckoj literatury; 1945. 376 p. (In Russ.).
2. Poluhin G. I., Cvelik V. A. State special standard and all-Union verification scheme for absolute pressure measuring instruments in the range of  $2.7 \cdot 10^2 - 4000 \cdot 10^2$  Pa. *Izmeritel'naya Tekhnika*. 1977;(6):5–6. (In Russ.).
3. Thomas A. M., Johnson D. P., Little J. W. Design of an interferometric oil manometer for vacuum measurement. Transactions the ninth national vacuum symposium, American vacuum society. 1962;468–473.
4. Aubry B., Delbart R. Manometre differential interferometrique systeme Peube. *Le Vide*. 1965;20(117):194–199.
5. Poulter K. F., Nash P. J. An interferometric oil micromanometer. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*. 1979;12:931–936.
6. Harrison E. R. et al. A new interferometric manometer. *Metrologia*. 1976. Vol.12. P. 115–122.
7. Heydemann P. L. M., Tilford C. R., Hyland R. W. Ultrasonic manometers for low and medium vacuum under development at the National Bureau of Standards // *Journal of Vacuum Science & Technology A*. 1977. Vol. 14(1). P. 597–605.
8. Miiller A. P. et al. Final report on key comparison CCM.P-K4 in absolute pressure from 1 Pa to 1 000 Pa. *Metrologia*. 2002;39(Tech. Suppl.):07001.
9. Perkin M. et al. Final report on key comparison CCM.P-K2. Pressure (10 kPa to 120 kPa). Absolute mode. *Metrologia*. 2008;45(Tech. Suppl.):07002. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/45/1A/07002>
10. Sadkovskaya I. V., Cvelik V. A., Kovalkov V. P., Eikhvald A. I. New State primary standard of pressure unit. *Mir izmerenij*. 2012;(2):19–25. (In Russ.).
11. Ricker 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(Tech. Suppl.):07002. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/54/1A/07002>
12. Yanhua Li et al. A new primary standard oil manometer for absolute pressure up to 10 kPa. *Metrologia*. 2015;52:111–120. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/52/1/111>
13. Ehlers S., Sabuga W. Progress in development of an interferometric oil manometer. *ACTA IMEKO*. 2020;9(5):334–337. [https://doi.org/10.21014/acta\\_imeko.v9i5.995](https://doi.org/10.21014/acta_imeko.v9i5.995)
14. Sadkovskaya I. V., Eikhvald A. I., Eikhvald T. A. Laser interferometric oil manometer of State primary pressure standard GET 101–2011. *Izmeritel'naya Tekhnika*. 2019;(3):3–7. (In Russ.). <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2019-3-3-7>
15. Sadkovskaya I. V., Eikhvald A. I. Laser interference mercury manometer of the state primary standard of pressure unit GET 101–2011. *Izmeritel'naya Tekhnika*. 2014;(11):11–14. (In Russ.).
16. Sadkovskaya I. V., Eichwald A. I., Rantanen M., Saxholm S. Results of comparisons of a laser interferometric oil manometer at VNIIM with the national standards of Finland. *Izmeritel'naya Tekhnika*. 2011;(5):66–70. (In Russ.).
17. 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;61(5):481–485. (In Russ.).
18. Sadkovskaya I. V., Eikhvald A. I., Eikhvald T. A. 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.).

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Лазерный интерференционный масляный манометр пат. RU2262677 С1 РФ; заявл. 18.10.2004; опубл. 20.10.2005, Бюл. № 29. 6 с.
- Лазерный интерференционный ртутный манометр пат. RU2559163 С1 РФ; заявл. 05.05.2014; опубл. 10.08.2015, Бюл. № 22. 8 с.
- Об утверждении Стратегии обеспечения единства измерений в Российской Федерации до 2025 г.; Распоряжение Правительства РФ от 19 апреля 2017 года № 737-р // Информационно-правовой портал Гарант.ру [сайт]. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71563952/>

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Садковская Ирина Владимировна** – канд. тех. наук, ведущий научный сотрудник научно-исследовательского отдела госэталонов в области измерений давления ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева», ученый хранитель эталона ГЭТ 101–2011

Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 19  
e-mail: i. v.sadkovskaya@vniim.ru

**Эйхвальд Алексей Игоревич** – канд. физ.-мат. наук, ведущий инженер ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»

Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 19

**Эйхвальд Татьяна Алексеевна** – инженер ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»

Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 19

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Irina V. Sadkovskaya** – Cand. Sci. (Eng.), Leading Researcher of the research department of state standards in the field of pressure measurements, D. I. Mendeleev Institute for Metrology, scientific custodian of the standard GET 101–2011

19 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190005, Russia  
e-mail: i. v.sadkovskaya@vniim.ru

**Aleksei I. Eikhvald** – Cand. Sci. (Phys.-Math.), Leading Engineer, D. I. Mendeleev Institute for Metrology

19 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190005, Russia

**Tatiana A. Eikhvald** – Engineer, D. I. Mendeleev Institute for Metrology

19 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190005, Russia