

ЭТАЛОНЫ

Обзорная статья
УДК 531.788:533.5
<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2022-18-2-73-88>



Развитие системы метрологического обеспечения в области вакуумных измерений: на примере ВНИИМ им. Д. И. Менделеева

А. А. Чернышенко  

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

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы, связанные с совершенствованием системы метрологического обеспечения в области вакуумных измерений в работах ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева». Обосновывается актуальность и востребованность вакуумной техники и вакуумных измерений для промышленности Российской Федерации. Автор показывает в исторической ретроспективе, какие тенденции и стратегии доминировали в данной области. Изложены основные этапы и результаты теоретических и практических научно-исследовательских работ в области вакуумных измерений, проведённых во ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» за последнее время. Подчеркивается, что в научном сообществе Российской Федерации и ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» существует колоссальный эвристический потенциал и солидная материальная база, которые позволяют ожидать новейших прогрессивных подходов и решений в области метрологического обеспечения вакуумных измерений.

Ключевые слова: эталон, вакуумная техника, вакуумные измерения, вакуумметры, эталонные вакуумметрические установки, программно-аппаратный комплекс, вакуум, средства измерений

Используемые сокращения: СИ – средство измерения; МЕРК – мембранно-емкостный вакуумметрический преобразователь компенсационного типа; МЭМС – микроэлектромеханические системы; ПАК – программно-аппаратный комплекс

Ссылка при цитировании: 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. № 3. С. 73–88 <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2022-18-2-73-88>

Статья поступила в редакцию 15.05.2022; одобрена после рецензирования 01.06.2022; принята к публикации 15.06.2022.

MEASUREMENT STANDARDS

Review article

Development of the Metrological Support System in the Field of Vacuum Measurements in the Works of D. I. Mendeleyev Institute for Metrology

Alexander A. Chernyshenko ✉

D. I. Mendeleyev Institute for Metrology, Saint Petersburg, Russia

✉ vacuum@vniim.ru

Abstract. The article deals with issues related to the improvement of the metrological support system in the field of vacuum measurements in the works of D. I. Mendeleyev Institute for Metrology (VNIIM). The relevance of vacuum technology and vacuum measurements for the industry of the Russian Federation is substantiated. The author shows the trends and strategies that dominate in this area in a historical retrospective. The main stages and results of theoretical and practical research work in the field of vacuum measurements carried out at the D. I. Mendeleyev Institute for Metrology (VNIIM) in recent years are described. It is emphasized that in the scientific community of the Russian Federation and D. I. Mendeleyev Institute for Metrology (VNIIM) there is a huge heuristic potential and a solid material base that allow us to expect the latest progressive approaches and solutions in the field of metrological support of vacuum measurements.

Keywords: measurement standard, vacuum equipment, vacuum measurements, vacuum gauges, reference vacuum measuring units, software and hardware complex, vacuum, measuring instruments

Abbreviations used: MI – measuring instrument; MEPK – membrane-capacitive transducer with compensation; MEMS – microelectromechanical systems; SHC – software-hardware complex

For citation: 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/10.20915/2077-1177-2022-18-3-73-88> (In Russ.).

The article was submitted 15.05.2022; approved after reviewing 01.06.2022; accepted for publication 15.06.2022.

Введение

Развитие высокотехнологичных отраслей науки и техники сегодня трудно представить без вакуумной техники и технологий, в том числе и измерительных. Вакуумные технологии и вакуумные измерения применяются в таких отраслях отечественной промышленности, как авиакосмическая отрасль, атомная промышленность, металлургия, медицина и многих других. В этой связи существенно возросли как количественные, так и качественные требования к системе метрологического обеспечения в области вакуумных измерений. Заметим, что количественные требования прежде всего выражаются в росте потребности отечественной промышленности в средствах измерений (СИ) низких абсолютных давлений и вакуума. Сошлемся на ранее опубликованную нашу статью [1] с результатами анализа,

позволяющими говорить о существенном росте количества первичных поверок СИ низких абсолютных давлений – вакуумметров, выполненных ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» в период с 2018 по 2021 гг. Так в 2021 г. количество первичных поверок составило около 500, что более чем в пять раз превышает показатель 2018 г., который составил всего 74 первичные поверки за год.

Помимо этого не подлежат сомнению актуальность и необходимость развития системы метрологического обеспечения в области вакуумных измерений. Отмечаются тенденции все возрастающих требований к метрологическим характеристикам как рабочих, так и эталонных СИ низких абсолютных давлений и вакуума. Растет и количество запросов к ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» о возможности приобретения

широкодиапазонных вакуумметров, позволяющих проводить измерения абсолютных давлений в широком диапазоне от 10^{-7} до 10^5 Па, а также высокоточных эталонных вакуумметров, таких как мембранно-емкостные вакуумметры, которые позволяют проводить измерения давлений с относительной погрешностью не более нескольких процентов. Также заметим, что продолжает увеличиваться количество запросов на изготовление и поставку эталонных вакуумметрических установок, предназначенных для поверки, калибровки и испытаний СИ низких абсолютных давлений – вакуумметров, в том числе и высокоточных.

Следует учитывать и тот факт, что сегодня без вакуумных измерений невозможно решить вопросы, обусловленные новыми подходами при определении основных единиц измерения физических величин, таких как единица массы – килограмм. Это связано с глобальными трансформациями международной системы метрологического обеспечения, связанными с тем, что основные единицы СИ сегодня стали определяться через фиксированные значения фундаментальных физических постоянных [2, 3].

На сегодняшний день нельзя игнорировать наметившиеся тенденции замедления темпов развития системы метрологического обеспечения в области вакуумных измерений в первом и втором кварталах 2022 г. Прежде всего, это можно связать с рядом санкционных ограничений, наложенных на высокотехнологичную продукцию, которая импортируется в РФ западными странами, в том числе и СИ низких абсолютных давлений. В этом аспекте, на первый план сегодня выходит задача обеспечить промышленность РФ отечественными средствами измерений низких абсолютных давлений и вакуума.

Таким образом, основная цель настоящей статьи – это ознакомление читателя с работами, реализуемыми во ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева», направленными на развитие системы метрологического обеспечения РФ в области вакуумных измерений в координатах сегодняшних реалий и связанных с ними задач дня.

Обзор литературы

Прежде чем мы приступим к основной теме этой статьи, уместно хотя бы коротко проследить историю появления вакуумной техники и вакуумных измерений (об этом подробно [4]). Здесь позволим себе привести отрывок. «Следует отметить, что необходимость в проведении метрологических исследований в области вакуумных измерений появилась благодаря развитию вакуумной техники, история которой восходит к I в. до н. э. В это время появились первые

упоминания о примитивных вакуумных насосах, которые были способны создавать небольшие разрежения газа (шприц Герона¹, водяной насос Ктезибия²) [5]. Однако фундаментальные исследования свойств разреженного газа и вакуума не проводились вплоть до VII в. Ряд историков полагает, что причина лежит в религиозных предрассудках. Например, известно, что один из них опирался на тезис: «Пустота может быть создана только всемогуществом божьим» (из решений Парижского Собора под представительством аббата Тампье, XIII в.) [5]. Так, в 1211 г. в уставе первого в мире университета (Парижского) было записано, что вопросами пустоты следует заниматься богословам, но никак не естественникам. На этот запрет церкви как на причину, ограничивающую возможности заниматься изучением пустоты, ссылался в XIV в. и французский философ-схоласт Иоанн Буридан (ок. 1300 – ок. 1358). Считается, что в XVII в. Галилео Галилей (1564–1642), не терпевший церковных догм, вычислил силу «боязни пустоты» из факта невозможности подъема воды на высоту более 10 м, какого бы диаметра труба не была» [6, с. 140–141].

В 1643 г. Эванджелистой Торричелли (1608–1647) [7] было определено, что атмосфера создает давление, равное давлению столба ртути высотой около 760 мм. Пространство над ртутью в барометрической трубке, которое, по представлению Торричелли, было «абсолютной пустотой», названо в честь ученого «торричеллиевой пустотой». Сегодня известно, что это пространство заполнено парами ртути, которые при температуре 293 по Кельвину имеют давление $1,6 \cdot 10^{-1}$ Па [5].

Дальнейшее развитие вакуумной техники связывают с именем немецкого физика Отто фон Герике (1602–1686) [8, 9], который изобрел первый механический воздушный насос (знаменитый опыт с магдебургскими полушариями состоялся в 1650 г.). Тем не менее долгое время, вплоть до XIX в., вакуум применялся практически лишь в устройствах для откачки воды. Следующую веку связывают с именем французского химика Жана Батиста Дюма (1800–1884), который в 1825 г. добился понижения давления методом вытеснения воздуха водяным паром из сосуда с последующим конденсированием его путем охлаждения. Значительную роль в развитии вакуумной техники в середине XIX в. сыграло также открытие немецкого химика Роберта Вильгельма

¹ Герон Александрийский – (Heronus Alexandrinus) (годы рождения и смерти неизвестны, вероятно, I в.), древнегреческий учёный, работавший в Александрии.

² Ктезибий, или Ктесибий (греч. Κτησιβίος, годы деятельности 285–222 г. до н. э.).

Бунзена (1811–1899), который осуществил откачку газа струей быстро истекающей жидкости, захватывающей газ.

И все же в отдельное направление исследований вакуумная техника выделилась только в тесной связи с развитием производства электровакуумных приборов. Важнейшим в этом смысле стало изобретение первого электровакуумного прибора – электрической лампы накаливания с угольным стержнем (1873 г.) русским ученым А. Н. Лодыгиным. В одном ряду стояли такие открытия, как термоэлектронная эмиссия из нагретых проводников (Т. А. Эдисон, 1883 г.) и фотоэлектрический эффект (А. Г. Столетов и Г. Герц, 1887 г.) [10]. Эти и ряд других открытий не только дополнили знания в области исследований низких абсолютных давлений и вакуума, но и привели к практически революционному развитию вакуумной техники [11,12].

Опишем еще некоторые его этапы. Так, в 1884 г. итальянский ученый А. Малиньяни [13] впервые применил в производстве вакуумных ламп накаливания связывание остаточных газов парами фосфора и тем самым положил начало применению различного рода газопоглотителей (так называемых геттеров) в вакуумной технике. Впоследствии были разработаны геттерные насосы. Так, в 1904 г. Дж. Дьюар разработал способ получения вакуума путем поглощения газов активированным углем, охлажденным жидким азотом. А чуть позже появляется первый ротационный ртутный насос немецкого физика В. Гедэ (1878–1945), после чего был разработан многопластинчатый насос с масляным уплотнением, с помощью которого можно было получать давления около 1 Па.

В 1911 г. Гедэ сконструировал первый молекулярный насос, а несколькими годами позже, в 1914–1916 гг., практически одновременно В. Гедэ, И. Ленгмюр и профессор Петроградского университета С. А. Боровик [14, 15] разработали ртутный диффузионный насос, способный создать давление около 10^{-5} Па. Процессы модернизации набирали силу, и в 1928 г. появляется паромасляный диффузионный насос К. Р. Бэрча, а затем множество различных модификаций (механических, пароструйных, молекулярных) насосов, которые и по сей день непрерывно совершенствуются и широко используются в современной вакуумной технике. В развитии технологий измерения низких давлений следует отметить такие достижения, как создание компрессионного манометра Г. Мак-Леодом (1874), теплового манометра М. Пирани (1906) [16] и ионизационного манометра О. Бакли (1916) [17].

Современная вакуумная техника сегодня способна обеспечить получение и измерение давления в 10^{18} раз меньше атмосферного, когда в 1 см^3 остается всего лишь около 30 молекул газа. Ее успехам способствовали многочисленные теоретические и экспериментальные работы, осуществленные еще в начале прошлого века. Именно серия классических исследований С. Дэшмана [18], М. Кнудсена [19], П. Клаузинга [20] и ряда других ученых позволили описать процессы, происходящие в вакуумных системах, и теоретически обосновать методы измерений низких абсолютных давлений, ставшие основой построения системы метрологического обеспечения в области вакуумных измерений.

В отечественной науке система метрологического обеспечения в области вакуумных измерений получила широкое развитие в работах Б. Д. Ершова [21], Г. Л. Саксаганского [22], Л. Н. Розанова [23], В. В. Кузьмина [24]. Валерий Васильевич Кузьмин долгое время работал руководителем лаборатории вакуумных измерений во ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева».

Работы, направленные на разработку отечественных высокоточных СИ низких абсолютных давлений – вакуумметров

Сегодня в научно-исследовательской лаборатории государственных эталонов и научных исследований в области измерений низкого абсолютного давления и вакуума ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» ведутся научно-исследовательские работы, направленные на дальнейшее совершенствование системы метрологического обеспечения в области вакуумных измерений. Их актуальность и прогрессивность обосновывается вызовами, которые ставят перед нами запросы науки, техники и технологий. На наш взгляд, одними из важнейших следует рассматривать работы, направленные на создание современных отечественных СИ низких абсолютных давлений – вакуумметров.

Разработка отечественного мембранно-емкостного вакуумметрического преобразователя компенсационного типа

В настоящее время в рамках работ по содержанию Государственного первичного специального эталона единицы давления для области абсолютных давлений в диапазоне $1 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^3$ Па (ГЭТ 49–2016) [25] проводится разработка мембранно-емкостного вакуумметрического преобразователя компенсационного типа (МЕПК) [26]. Далее приведем принцип действия разрабатываемого преобразователя, опираясь на материалы доклада, сделанного в июне 2022 г. на 29-й

Всероссийской научно-технической конференции «Вакуумная техника и технологии – 2022» [27]. Принцип действия заключается в том, что сила, возникающая в результате давления газа на мембрану и приводящая к ее деформации, компенсируется электростатической силой, возникающей в плоском конденсаторе, обкладками которого является сама мембрана и специальный неподвижный электрод (компенсирующий электрод), диаметр которого равен диаметру мембраны. О том, что сила давления полностью скомпенсирована электростатической силой, судят по постоянству емкости другого конденсатора, обкладками которого также является сама мембрана и второй специальный неподвижный электрод, находящийся с противоположной стороны мембраны, по сравнению с компенсирующим электродом, если знать расстояние между мембранной и компенсирующим электродом и измерить прикладываемое напряжение, необходимое для компенсации силы давления, можно определить величину давления согласно уравнению

$$p = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon U^2}{2h^2},$$

где ε_0 – диэлектрическая постоянная;

ε – диэлектрическая проницаемость газа, в вакууме равна единице;

h – расстояние между компенсирующим электродом и мембраной;

U – компенсирующее напряжение.

Целями данной разработки являлись:

1. Устранение недостатков существующего МЕРК, который входит в состав ГЭТ 49–2016, был изготовлен в 1970–1980 гг. века и физически устарел.

2. Создание серийно выпускаемого мембранно-емкостного эталонного вакуумметра для решения вопросов импортозамещения аналогичных вакуумметров импортного производства и обеспечения потребностей промышленности РФ.

В процессе разработки решался комплекс научных и технических задач, таких как:

1. *Выбор материала мембраны и способа ее заделки.* В рамках решения этой задачи рассматривались возможности изготовления мембраны из монокристаллического кремния и нержавеющей стали. В качестве преимуществ изготовления мембраны из монокристаллического кремния рассматривались, прежде всего, его механические свойства, а также то, что технология изготовления достаточно отработана и обеспечивает необходимую точность изготовления, которая важна для

МЕРК, используемого в качестве первичного эталона в ГЭТ 49-2016. Однако от использования кристаллического кремния пришлось отказаться в силу высокой стоимости работ по изготовлению, что не позволяет получить конкурентно способный вакуумметр. Поэтому было решено использовать классический материал – нержавеющую сталь. В ходе дальнейшей работы рассматривались способы крепления мембраны, такие как свободная и глухая заделка кромки мембраны, а также вид мембраны: плоская и гофрированные мембраны. Заметим, что главными условиями при этом являлись обеспечение необходимого уровня *герметичности* мембраны и обеспечение необходимого уровня *чувствительности* мембраны. Для принятия решения был изготовлен ряд мембран и выполнена их заделка различными способами (защемление, пайка, сварка). Изготовленные опытные образцы приведены на рис. 1.

Исследования полученных образцов определили выбор предпочтительных форм мембран и технологии их заделки. Так, мембрана МЕРК, используемого в ГЭТ 49-2016, должна быть плоской, а ее заделка – комбинированной с использованием сварки. В то же время для мембран, применяемых для серийного производства вакуумметров, предпочтительнее гофрированная мембрана и свободная заделка мембраны, поскольку это дает более высокую чувствительность вакуумметра и обеспечивает более широкий диапазон измерений.

2. С учетом установленных требований к способам заделки мембран и используемым для ее изготовления материалам была *разработана конструкция* измерительного преобразователя компенсационного типа, приведенная на рис. 2.

Данная конструкция обеспечивает установку мембраны и компенсирующего электрода равных диаметров в отличие от существующего МЕРК в составе ГЭТ 49-2016, что позволяет отказаться от поправки на неравенство диаметров электрода и мембраны и, как следствие, уменьшить погрешность воспроизведения давления эталоном. Также отметим, что разработанная конструкция имеет современные присоединительные вакуумные фланцы, что позволяет интегрировать разрабатываемый МЕРК практически в любую существующую вакуумную систему.

Необходимо подчеркнуть, что сегодня совместно с ЗАО «Тимос» идет этап изготовления разработанной конструкции МЕРК. Опытный образец планируется к выпуску в конце 2022 г. На 2023 г. запланированы исследования метрологических характеристик нового МЕРК.



Рис. 1. а) Макеты мембран, изготовленные для мембранно-емкостного преобразователя; б) мембранные узлы с различными видами заделки мембран (пайка, сварка, защемление)

Fig. 1. a) Membrane layouts made for a membrane-capacitive transducer; b) membrane assemblies with various types of membrane sealing (soldering, welding, pinching)

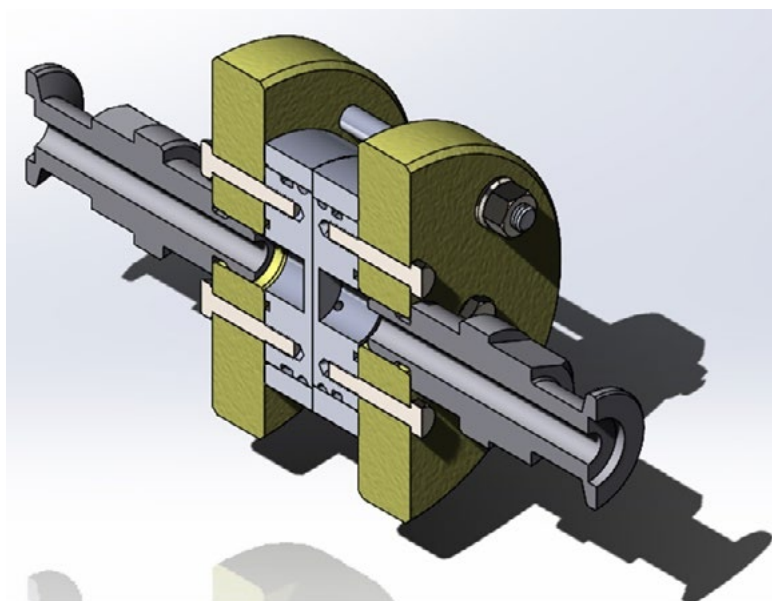


Рис. 2. Конструкция измерительного мембранно-емкостного преобразователя компенсационного типа, изображенная в виде 3D модели

Fig. 2. A 3D model of the design of the measuring membrane-capacitive transducer of the compensation type

Разработка отечественного высокоточного деформационно-частотного вакуумметра

Другой разработкой ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева», направленной на обеспечение промышленности РФ отечественными высокоточными СИ низких абсолютных давлений, является разработка деформационно-частотного вакуумметра. На идею

реализации нового способа измерений давления натолкнули исследования возможности использования кристаллического кремния для изготовления мембраны для МЕРК. Это позволило оценить возможности микроэлектромеханических систем (МЭМС). Изучение существующих изделий МЭМС, таких как акселерометры и гироскопы, натолкнуло на идею создания

вакуумметра нового типа, изготавливаемого с использованием технологии МЭМС. В ходе дальнейших работ был предложен новый способ измерения низкого абсолютного давления и устройство для его осуществления (патент на изобретение в федеральном институте промышленной собственности под № RU2749644 С1 «Способ измерения низкого абсолютного давления газа и устройство для его осуществления» [28]). В основе нового способа измерений давления лежит зависимость собственной частоты автоколебаний тела (пластины), установленного на упругих подвесах между двумя неподвижными пластинами на равных расстояниях от них, от давления.

Проведенные теоретические исследования позволили получить уравнение измерения давления газа:

$$p = 2\pi^2 \rho h Z (f^2 - f_i^2) = k(f^2 - f_i^2),$$

где ρ – плотность колеблющегося тела (пластины);

h – толщина колеблющейся пластины;

Z – размер зазоров между пластиной и неподвижными пластинами;

f_i – собственная частота колебаний подвижной пластины при нулевом давлении;

f – собственная частота колебаний подвижной пластины, пропорциональная давлению.

Новый способ измерения низкого абсолютного давления и устройство для его осуществления были реализованы в виде опытного образца высокоточного деформационно-частотного вакуумметра, фотография которого приведена на рис. 3.

Следует отметить, что чувствительный элемент первичного преобразователя вакуумметра был изготовлен

по технологии МЭМС. По результатам исследований изготовленного опытного образца были получены следующие реализуемые метрологические характеристики:

- диапазон измерений, Па: от 10 до 10000;
- относительная погрешность измерений, %: ± 2 .

Полученные метрологические характеристики позволяют эксплуатировать разработанный вакуумметр в качестве рабочего эталона и применять его для поверки и калибровки рабочих СИ. Следует сказать, что такие преимущества технологии МЭМС, как небольшие размеры, масса, объем изготавливаемого изделия; низкое энергопотребление изготавливаемого изделия; относительно невысокая стоимость; простота интеграции в системы и возможность изготовления большого количества (партий) позволяют в достаточно короткие сроки организовать и наладить серийное производство отечественных вакуумметров. С целью налаживания серийного выпуска сегодня ведётся поиск организаций, готовых наладить выпуск чувствительных элементов, изготовленных по технологии МЭМС, а также вакуумметра в целом.

Работы по созданию эталонных вакуумметрических установок, предназначенных для поверки и калибровки СИ низких абсолютных давлений и вакуума

Помимо разработки СИ низких абсолютных давлений – вакуумметров в ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» интенсивно ведутся разработки эталонных вакуумметрических установок, предназначенных для поверки и калибровки вакуумметров.



Рис. 3. Опытный образец высокоточного деформационно-частотного вакуумметра

Fig. 3. Prototype of a high-precision deformation-frequency vacuum gauge

Наиболее интересной, на наш взгляд, является разработка эталонной вакуумметрической установки первого разряда для Федерального бюджетного учреждения «Государственный региональный центр стандартизации, метрологии и испытаний в г. Москва и Московской области». Разрабатываемая установка будет иметь следующие метрологические характеристики:

Диапазон измерений, Па: от $1 \cdot 10^{-7}$ до $1 \cdot 10^5$;

Пределы допускаемой относительной погрешности, в соответствии с ГОСТ 8.107-81, % от измеряемой величины:

- в диапазоне измерений от $1 \cdot 10^{-7}$ до $5 \cdot 10^{-5}$ Па ± 7 ;
- в диапазоне измерений свыше $5 \cdot 10^{-5}$ до $1 \cdot 10^2$ Па ± 5 ;
- в диапазоне измерений свыше $1 \cdot 10^2$ до $1 \cdot 10^5$ Па $\pm (3-2)$.

Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений в соответствии с Приказом № 2900, Па:

- в диапазоне измерений от 0,2 до 1 кПа $\pm (10-30)$;
- в диапазоне измерений свыше 1 до 10 кПа ± 20 ;
- в диапазоне измерений свыше 10 до 100 кПа ± 50 .

Существенным отличием разрабатываемой модели от эксплуатируемых в настоящее время в РФ установок является реализация нескольких методов измерений давления, в том числе абсолютных, таких как метод статического расширения [29], метод динамического расширения [30] и метод непосредственного сличения. В составе установки предусмотрен отдельный модуль – задатчик давления, который предназначен для реализации метода статического расширения. При помощи этого модуля осуществляется воспроизведение давления в диапазоне от 10^{-1} Па до 10^3 Па в соответствии с уравнением измерений

$$p = \frac{V_1}{V_2} p_{исх.} = k \cdot p_{исх.},$$

где p – давление, воспроизводимое (измеряемое) эталонной вакуумметрической установкой;

V_1 – малый объем, откуда происходит расширение газа, давление которого предварительно измеряется;

V_2 – объем вакуумной системы эталонной вакуумметрической установки, включая измерительную камеру, куда происходит расширение газа из малого объема;

$p_{исх.}$ – давление, которое предварительно измеряется в малом объеме.

С целью реализации метода динамического расширения планируется использовать задатчик потока газа в вакууме [31] и диафрагму диаметром 10 мм, встроенные в разрабатываемую установку. Уравнение

измерений в случае использования метода динамического расширения

$$p = \frac{Q}{U} (1 + \delta_0 + \delta_q),$$

где p – давление воспроизводимое (измеряемое) эталонной вакуумметрической установкой;

Q – поток газа, поступающий в измерительную камеру эталонной вакуумметрической установки, регулируемый при помощи задатчика потока газа;

U – проводимость диафрагмы;

δ_0 – поправка на остаточное давление газа;

δ_q – поправка на собственное газоотделение и течение вакуумной системы эталонной вакуумметрической установки.

Отметим, что аналогичную эталонную вакуумметрическую установку ВНИИМ им. Д. И. Менделеева разрабатывает в настоящий момент времени для Белорусского государственного института метрологии (БелГИМ).

Отметим также, что все вышеуказанные разрабатываемые установки практически полностью, за исключением высоковакуумных эталонных вакуумметров и части электронных компонентов, будут изготовлены из отечественных комплектующих. Плановый срок завершения работ по разработке и изготовлению вышеуказанных рабочих эталонов – 2023 г.

Реализация в конструкции установок различных измерительных модулей, позволяющих применить разные методы измерений низких абсолютных давлений, а также высокотехнологичность и наукоёмкость разрабатываемых эталонных установок повлекли за собой необходимость автоматизации отдельных процедур, таких как создание и поддержание давления. Подлежат автоматизации непосредственно поверка в соответствии с различными методиками, самодиагностика, регистрация результатов измерений, обучение персонала и другие. В рамках решения задач по автоматизации, ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» сформировалась эвристическая концепция «Эталон на столе», которая подтолкнула к идее разработки программно-аппаратного комплекса (ПАК), предназначенного для расширения охвата метрологической сети в области вакуумных измерений.

Концепция «Эталон на столе» и программно-аппаратный комплекс для области вакуумных измерений

В основу предложенной концепции легли такие требования к эталонам, как доступность, универсальность, интеллектуальность и компактность. В рамках реализации такого «эталона на столе» для области вакуумных

измерений были проведены исследования, которые позволили разработать Универсальный интеллектуальный транспортируемый эталон модульного типа для поверки и калибровки средств измерений низких абсолютных давлений и вакуума [32].

Разрабатываемый эталон будет представлять собой конструкцию, состоящую из отдельных независимых транспортируемых модулей, таких как:

1. Модуль создания и поддержания низких абсолютных давлений и вакуума, предназначенный для обеспечения регулировки давления в диапазоне $1 \cdot 10^{-3}$ до 10^5 Па.

2. Измерительный модуль для обеспечения процедур поверки и калибровки, а также для передачи единицы давления в соответствии с действующими поверочными схемами и методиками в области измерений давления. Планируется, что модуль будет реализовывать два метода измерений: метод непосредственного сличения и метод статического расширения. Заметим, что метод статического расширения – это абсолютный высокоточный метод измерений низких абсолютных давлений, который реализован в ряде первичных эталонов некоторых стран, например, в национальном эталоне Турции [33]. Отличительной особенностью реализации данного метода в разрабатываемом универсальном интеллектуальном транспортируемом эталоне модульного типа для поверки и калибровки средств измерений низких абсолютных давлений и вакуума является его автоматизация и минимизация вакуумной системы с целью обеспечения возможности транспортировки и компактности измерительного модуля, что, однако, дает некоторую потерю точности по сравнению с существующими первичными эталонами, в которых он реализован.

3. Программно-аппаратный комплекс (ПАК), изготавливаемый в виде отдельного модуля, который предназначен для проведения самодиагностики эталона, автоматизации процедур поверки и регистрации результатов измерений, контроля условий окружающей среды,

а также обеспечения возможностей проведения дистанционной поверки и обучения поверителей в режиме тренажера.

На сегодняшний день опытный образец ПАК реализован (об этом подробно см. [34]). Структурная схема ПАК приведена на рис. 4.

Комплекс состоит из блока управления (БУ), регулятора расхода газа, датчиков для измерения условий окружающей среды, WiFi-модуля для передачи измерительных данных в интернет-облако хранения, программное обеспечение (ПО) для персонального компьютера (ПК) «Калибровка вакуумметров. 2310-1-2020», ПО «Поверка SVM-211 v.1.0», ПО «Условия окружающей среды». Здесь отметим, что ПО «Калибровка вакуумметров. 2310-1-2020» предназначена для автоматизации процедур поверки, калибровки и регистрации результатов измерений, главное окно ПО показано на рис. 5.

Разработанное ПО «Калибровка вакуумметров. 2310-1-2020» позволяет проводить автоматическую поверку и калибровку СИ низких абсолютных давлений и вакуума в соответствии с различными методиками, а также позволяет в произвольном порядке устанавливать необходимые величины давлений в измерительной камере эталона.

Назначение ПО «Поверка SVM-211 v.1.0» – это обучение поверителей на месте эксплуатации эталона. Главное окно ПО показано на рис. 6.

Данное ПО имеет два режима работы:

– режим виртуального тренажера, когда поверитель обучается, не притрагиваясь к «железу» – эталону во избежание его поломки и в силу отсутствия опыта выполняет процедуру поверки виртуально на дисплее ПК, тем самым изучая и отрабатывая порядок поверки до автоматизма;

– режим реального тренажера, когда поверитель обучается непосредственно в привязке к «железу» – эталону, а ПО подсказывает обучающемуся порядок

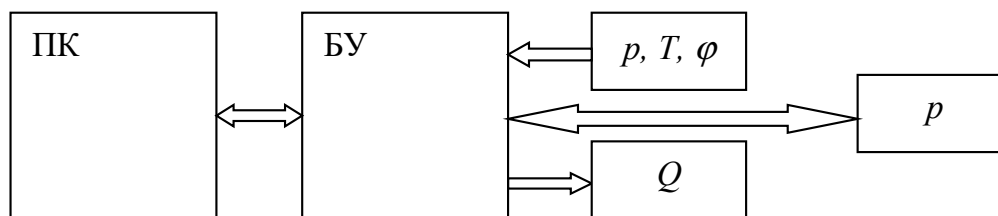


Рис. 4. Структурная схема ПАК, где ПК – персональный компьютер с установленным специальным программным обеспечением, БУ – блок управления, Q – регулятор расхода газа, p, T, φ – датчики измерений условий окружающей среды, p – вакуумметр для измерения давления в вакуумной системе

Fig. 4. The block diagram of the SHC, where ПК is a personal computer with special software installed, БУ is a control unit, Q is a gas flow regulator, p, T, φ – sensors for measuring environmental conditions, p is a vacuum gauge for measuring pressure in a vacuum system

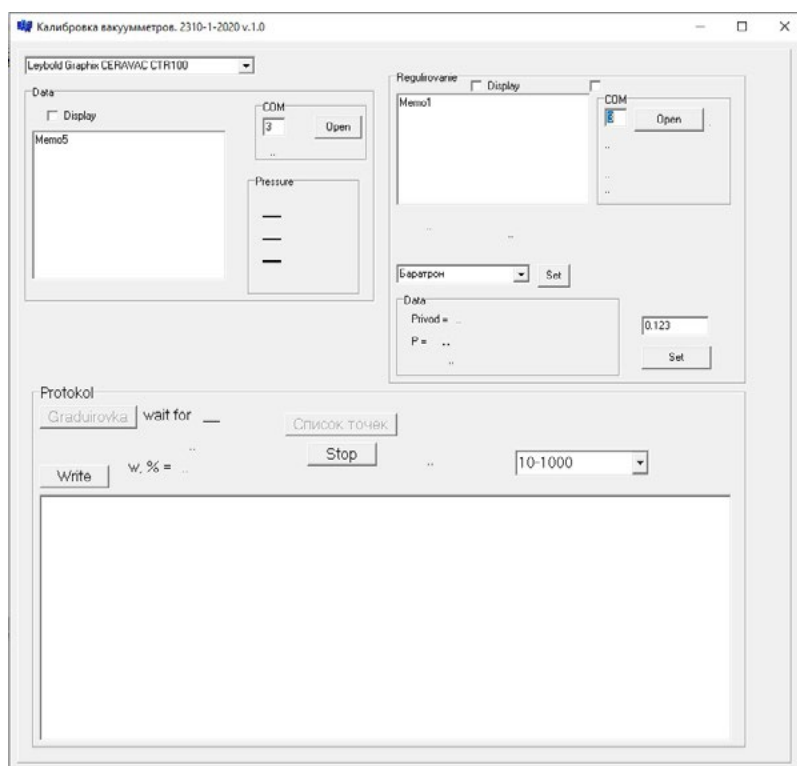


Рис. 5. Главное окно программы для ПК «Калибровка вакуумметров. 2310–1–2020»

Fig. 5. The main window of the PC program «Calibration of vacuum gauges. 2310–1–2020»

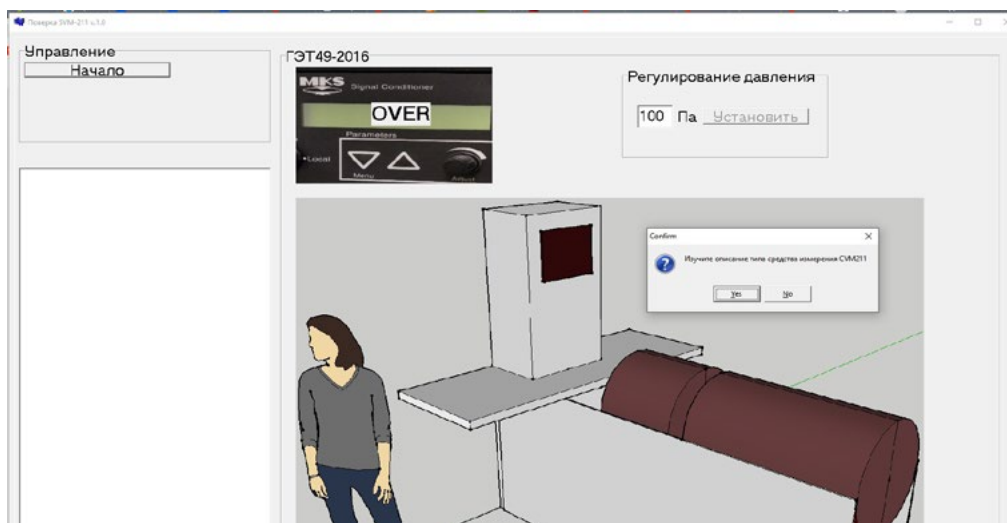


Рис. 6. Главное окно программы для ПК «Поверка SVM-211 v.1.0»

Fig. 6. The main window of the PC program «Verification SVM-211 v.1.0»

действий, а также осуществляет их контроль и блокировку, в случае ошибок поверителя.

Следует отметить, что разработанное ПО «Поверка SVM-211 v.1.0» уже нашло свое применение на кафедре теоретической и прикладной метрологии

ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» в рамках обучения слушателей по специальности «Специалист по метрологии».

Также нашло свое применение и разработанное ПО «Условия окружающей среды», которое предназначено

для регистрации условий окружающей среды. Так, в настоящее время при помощи данного ПО круглосуточно ведется мониторинг условий окружающей среды в лаборатории вакуумных измерений, причем данные мониторинга сохраняются как на жестком диске ПК, так и в облачном хранилище, что позволяет их просматривать практически из любой точки мира. На рис. 7 представлено окно регистрации результатов мониторинга окружающей среды в облачном хранилище.

В заключение подчеркнем, что универсальность и модульная компоновка эталона позволят в перспективе без существенных затрат совершенствовать уже имеющиеся на предприятиях РФ рабочие эталоны низких абсолютных давлений и вакуума. Достаточно будет встроить недостающие модули, чтобы расширять измерительные и функциональные возможности эталона, а не изготавливать его с нуля.

Обсуждение

В рамках обсуждения обратимся к работам, направленным на развитие системы метрологического обеспечения в области вакуумных измерений в условиях новых подходов к определению основных единиц измерения физических величин, таких как единица массы – килограмм. Они обоснованы глобальными трансформациями международной системы метрологического обеспечения. Новые определения основных единиц

теперь опираются на основные фундаментальные константы. Это означает, что эталоны и средства измерений, которые опираются на фундаментальные константы, становятся предпочтительными, а на языке метрологов – первичными, в том числе и эталоны производных единиц системы СИ, такие как эталоны в области вакуумных измерений давлений. Произшедшая трансформация Международной системы единиц ставит перед международным метрологическим сообществом ряд вопросов: «А что изменится для метрологов, работающих на местах?», «Что будет с производными единицами, такими как давление, сила и другими?» и т. д. И конечно, важен анализ изменений, которые возможны в области вакуумных измерений в ближайшей перспективе, и учёт их для выбора направлений развития в данной области измерений. С целью найти ответы на эти вопросы во ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» были проведены исследования процессов и тенденций перемен, происходящих в области измерений давлений и вакуума (об этом подробно см. [35, 36]).

Другими целями исследований были:

1. Формирование состава комплекса первичных эталонов передовых стран в области измерений давлений.
2. Выявление работ по совершенствованию комплексов первичных эталонов в области измерений давлений, ведущихся в рамках переопределения основных единиц СИ.

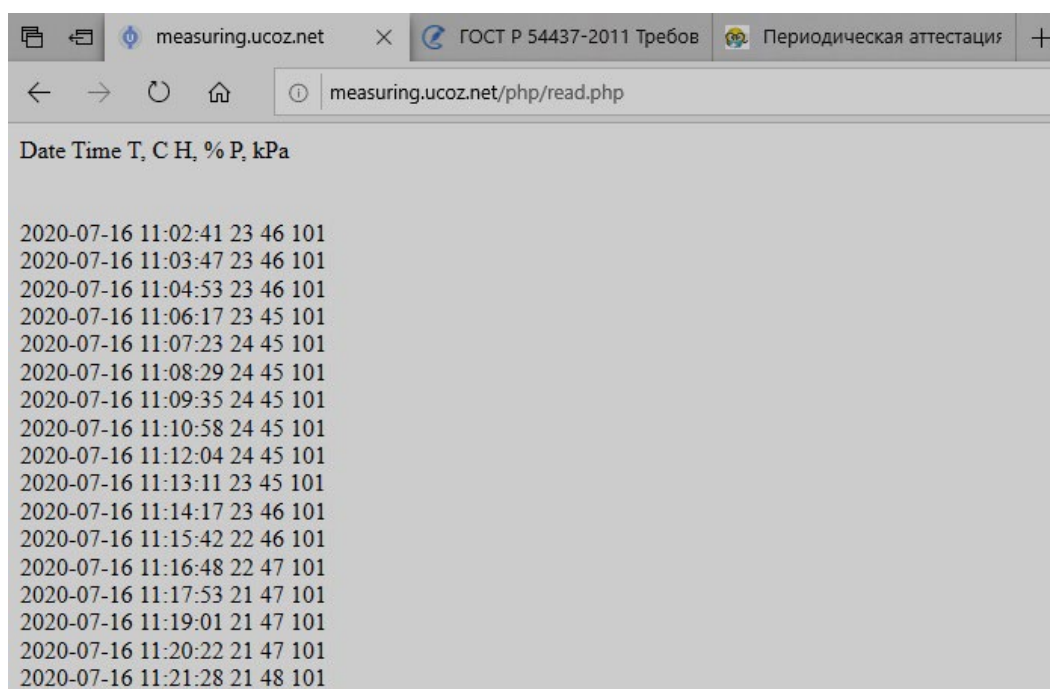


Рис. 7. Окно регистрации результатов мониторинга окружающей среды в облачном хранилище ПО «Условия окружающей среды»

Fig. 7. The window for registering the results of environmental monitoring in the cloud storage software «Environmental conditions»

3. Сопоставление состава комплекса первичных эталонов в области вакуумных измерений РФ и работ по их совершенствованию, ведущихся в рамках переопределения основных единиц с аналогичными зарубежными работами и комплексами.

В ходе исследований было выявлено, что в области измерений давлений и вакуума среди существующих классических эталонов появляются новейшие эталоны давления [37, 38, 39, 40], которые имеют ряд существенных отличий от классических:

1. Методы и принципы воспроизведения единицы давления новейших эталонов опираются непосредственно на фундаментальные физические константы. В изученных публикациях описаны эталоны, обеспечивающие методы воспроизведения давлений на основе рефракции света, которые опираются на зависимость коэффициента преломления газов от давления; на основе измерения диэлектрической проницаемости, в основе которых лежит зависимость диэлектрической проницаемости газов от давления; на основе поведения холодных атомов в магнитной ловушке, в основу метода измерений которых положена зависимость скорости релаксации холодных атомов при столкновении с молекулами газа.

2. Мировое сообщество метрологов, инициировавшее переопределение основных единиц СИ, направляет свои усилия на разработку и создание новейших эталонов.

3. Разрабатываемые новейшие эталоны давлений охватывают практически весь диапазон измеряемых давлений.

В результате исследований была построена структурно-иерархическая схема комплекса первичных эталонов давления передовых стран, приведенная на рис. 8, которая учитывает первичность эталонов, опирающихся на воспроизведение давлений через основные фундаментальные константы, и которая существенно отличается от классической структурно-иерархической схемы прежде всего тем, что ряд первичных эталонов, таких как грузопоршневые манометры, U-образные манометры, деформационные средства измерений и другие из статуса первичных переходят в статус вторичных эталонов. И наоборот, ряд эталонов, которые имели в классической схеме статус вторичных, приобретают статус первичных, например, емкостные манометры (вакуумметры), эталоны потока газа в вакууме.

Построенная схема позволяет говорить о том, что переопределение основных единиц может кардинально изменить систему метрологического обеспечения в области вакуумных измерений.

Следует сказать, что, к сожалению, в настоящее время в РФ не ведутся практические работы, нацеленные на создание новейших эталонов в области вакуумных измерений, опирающихся на основные фундаментальные константы. В дальнейшем



Рис. 8. Структурно-иерархическая схема комплекса первичных эталонов давления передовых стран, опирающаяся на первичные эталоны, методы измерений которых основаны на фундаментальных константах

Fig. 8. Structural and hierarchical diagram of the complex of primary pressure standards of advanced countries based on primary measurement standards, measurement methods of which are based on the basic fundamental constants

в связи с трансформацией Международной системы единиц это может привести РФ к отставанию и потере независимости в области вакуумных измерений. Для того чтобы этого не произошло, в ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» планируется в ближайшие годы проведение ряда теоретических и практических исследований, направленных на изучение перспектив и возможностей создания новейших эталонов в области вакуумных измерений.

Заключение

В заключение необходимо сказать, что научно-исследовательские работы, проводимые в ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» в области вакуумных измерений, направлены, прежде всего, на решение следующих задач:

1. Обеспечение передачи единицы давления при помощи одного эталонного комплекса в диапазоне абсолютных давлений от 0,1 до $1 \cdot 10^5$ Па согласно разным поверочным схемам, таким как ГОСТ 8.107–81, и Приказу Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 06 декабря 2019 г. № 2900.
2. Создание интеллектуальной измерительной системы – эталона, который позволит проводить поверки и калибровки средств измерений низких абсолютных давлений; обучать поверителей и калибровщиков в режиме реального времени на месте эксплуатации эталона; производить мониторинг условий окружающей среды и дистанционную поверку средств измерений низких абсолютных давлений на местах эксплуатации данных средств измерений.
3. Оснащение предприятий РФ, военно-промышленного комплекса, метрологических центров РФ

современными отечественными средствами измерений низких абсолютных давлений и вакуума.

Коллектив исследователей в области вакуумных измерений ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» уверен, что успешное решение заявленных задач позволит получить существенные экономические и социальные эффекты, в первую очередь за счет внедрения разрабатываемых в институте средств измерений низких абсолютных давлений и вакуума, а именно вакуумметров и вакуумметрических эталонных установок на предприятиях РФ, а также за счет расширения охвата метрологической сети РФ в области вакуумных измерений.

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

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

Конфликт интересов: Материал статьи подготовлен на основе доклада, представленного на 29-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Вакуумная техника и технологии – 2022» (21–23 июня 2022 г., Санкт-Петербург, Россия). Статья допущена к публикации после доработки материалов тезисов доклада, оформления статьи и проведения процедуры рецензирования.

Conflict of interests: The article was prepared on the basis of the report presented at the 29th All-Russian Scientific and Technical Conference with International Participation «Vacuum Equipment and technologies – 2022» (June 21–23, 2022, St. Petersburg, Russia). The article was approved for publication after the revision of the abstracts of the report, the design of the article and the review procedure.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Сенатов Д. Е., Чернышенко А. А. Совершенствование диафрагмы большой проводимости из состава установки эталонной 1-го разряда вакуумметрической редукционной ВОУ-1 // Вакуумная техника и технологии – 2021 : сб. труд. 28-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 22–24 июня 2021 / под ред. Анцуковой А. И. [и др.] СПб. : Изд-во СПбГЭТУ ЛЭТИ, 2021. С. 134–139.
2. Чернышенко А. А., Каменских Ю. И. Вакуумная система Ватт-весов: аспекты разработки // Эталоны. Стандартные образцы. 2021. Т. 17, № 4. С. 5–12. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2021-17-4-5-12>
3. Чернышенко А. А. «Эталон на столе» – новая реальность в условиях глобальной трансформации Международной системы единиц // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2022. Т. 15, № 2. С. 5–22. <https://doi.org/10.32603/2071-8985-2022-15-2-5-22>
4. Чернышенко А. А. Теоретические и практические вопросы разработки эталона для поверки и калибровки мер потока газа в вакууме. СПб.: Редакция Парадигма, 2020. 176 с.
5. Основы вакуумной техники: учебник для техникумов электрон. Приборов / А. И. Пипко [и др.]. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоиздат, 1981.
6. Чернышенко А. А. К истории метрологических исследований в области потока газа в вакууме // Парадигма: философско-культурологический альманах. 2016. № 23. С. 140–148.
7. Кудрявцев П. С. Эванджелиста Торричелли. М.: Знание, 1958.
8. Лебедев В. И. Исторические опыты по физике: научное издание. М.; Л.: ОНТИ, 1937. 311 с.
9. Льюис М. История физики: пер. с итал. Э. Л. Бурштейна. М.: Мир, 1970.

10. Столетов А. Г. Очерки развития наших сведений о газах. Собр. соч. М.; Л.: 1941.
11. Грошковский Я. Техника высокого вакуума: пер. с польского В. Л. Булата, Э. Л. Булата с приложением Э. М. Рейхруделя, Г. В. Смирницкой. М: Мир, 1975.
12. Левин Г. Основы вакуумной техники: пер. с англ. Н. Б. Шпаро, А. М. Ямпольского; под общ. ред. проф. Р. А. Нилендера. М.: Энергия, 1969.
13. Чеффи Э. Л. Теория электронных ламп : учеб. пособие для вузов связи : пер. с англ. Э. Л. Чеффи; под ред. Н. А. Никитина. М.: Связьтехиздат, 1937.
14. Боровик С. А. Два новых насоса высокого разрежения // Журнал Русского физико-химического общества. Часть физика. 1913. Т. 45. Вып. 8. Отд. 2.
15. Боровик С. А., Павлов В. И. Получение светящегося разряда в газе при малых разностях потенциалов. Петроград: Печатный труд, 1915.
16. Каценеленбоген М. Е., Власов В. Н. Справочник работника механического цеха. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Машиностроение, 1984. 239 с.
17. Kelly M. J. Oliver Ellsworth Buckley (1887–1959): Biographical Memoir. Washington: National academy of sciences, 1964. 34 p.
18. Дзшман С. Научные основы вакуумной техники: пер. с англ., под ред. М. И. Меньшикова. М.: Мир, 1964. 715 с.
19. Knudsen M. The kinetic theory of gases. some modern aspects. London: MethuenL, 1934.
20. Ерюхин А. В. Основы вакуумных измерений. М. : Машиностроение, 1977. 40 с.
21. Ершов Б. Д., Попов Н. Г., Саксаганский Г. Л. Методы анализа молекулярных потоков. Ротапринт. Ленинград : НИИЭФА, 1979. 64 с.
22. Саксаганский Г. Л. Молекулярные потоки в сложных вакуумных структурах. М.: Атомиздат, 1980. 216 с.
23. Розанов Л. Н. Вакуумная техника: учебник для вузов по специальности Вакуумная техника. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Высшая школа, 1990. 320 с.
24. Кузьмин В. В., Аляев В. А. Техника измерения вакуума: монография. Казань : КГТУ, 2009. 299 с.
25. New state primary standard GET 49–2016 of reproduction pressure unit in range 10–6–103 Pa / V. N. Gorobei [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 387, № 1. 012023. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/387/1/012023>
26. Gorobei V. N., Izrailov E. K., Kuvandykov R. E., Lobashev A. A. and Chernyshenko A. A. Membrane-capacitive transducer with compensation for the primary standard of pressure / I. V. Andronov [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 387, № 1. 012002. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/387/1/012002>
27. Чернышенко А. А. К вопросу о развитии системы метрологического обеспечения в области вакуумных измерений в настоящее время // 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. 107–114.
28. Способ измерения низкого абсолютного давления газа и устройство для его осуществления: патент RU2749644 C1, заявл. 23.11.2020; опубл. 16.06.2021.
29. Горобей В. Н., Чернышенко А. А. Метод статического расширения на основе мембранно-емкостного вакуумметра. Вакуумная техника и технологии // 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. 67–69.
30. Фомин Д. М., Чернышенко А. А. Вакуумметрическая редуцирующая установка для государственного первичного специального эталона единицы абсолютного давления в диапазоне 1·10⁻⁶ – 1·10³ Па // Вакуумная техника, материалы и технология : материалы XII международной научно-технической конференции, Москва, 11–13 апреля 2017 г. / под ред. д-ра техн. наук, профессора С. Б. Нестерова. М.: Новелла : ОАО НИИВТ им. С. А. Векшинского, 2017. С. 67–71.
31. Чернышенко А. А. К вопросу о системе метрологического обеспечения Российской Федерации в области измерений потоков газов в вакууме и перспективах ее развития // Вакуумная техника и технологии – 2021 : труды 28-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 21–24 июня 2021 г. / под ред. Анцуковой А. И. [и др.] СПб. : Изд-во СПбГЭТУ ЛЭТИ, 2021. С. 128–133.
32. Сенатов Д. Е., Чернышенко А. А. Универсальный интеллектуальный транспортируемый эталон модульного типа для поверки и калибровки средств измерений низких абсолютных давлений и вакуума // Актуальные задачи военной метрологии : сборник докладов 47-й научно-технической конференции молодых ученых и специалистов военных метрологов, 2022 г. С. 253–257.
33. Kangi R., Ongun B., Elkatmis A. The new UME primary standard for pressure generation in the range from 9×10⁻⁴ Pa to 10³ Pa // Metrologia. 2004. Vol. 41. 251. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/41/4/005>
34. Кувандыков Р. Э. и Чернышенко А. А. Модернизация программно-аппаратного комплекса отдела государственных эталонов в области измерения давления для проведения калибровки вакуумметров и разработка поверочного тренажера // Вакуумная техника и технологии – 2021 : сб. труд. 28-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Санкт-Петербург, 22–24 июня 2021 / под ред. Анцуковой А. И. [и др.] СПб. : Изд-во СПбГЭТУ ЛЭТИ, 2021. С. 73–79.
35. 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.

36. 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.
37. Moldover M. R. Can a pressure standard be based on capacitance measurements? // Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology. 1998. № 103(2). P. 167–175.
38. Perspectives for a new realization of the pascal by optical methods / K. Jousten [et al.] // Metrologia. 2017. № 54(6). P. 146–161.
39. Development of a new UHV/XHV pressure standard (Cold Atom Vacuum Standard) / J. Scherschligt [et al.] // Metrologia. 2017. № 54(6). P. 125–132. <https://doi.org/10.1088/1681-7575/aa8a7b>
40. Gaiser C., Fellmuth B., Sabuga W. Primary gas-pressure standard from electrical measurements and thermophysical ab initio calculations // Nature Physics. 2020. № 16. P. 177–180. <https://doi.org/10.1038/s41567-019-0722-2>

REFERENCE

1. Senatov D. E., Chernyshenko A. A. Improvement of the High-conductivity Diaphragm From the Composition of the Reference 1st Category of Vacuum Gauge Reduction VOU-1. In: *Proceedings of the 28th All-Russian Conference with International Participation Vacuum Technique and Technology* – 2021; 2022 June 22–24; St. Petersburg, Russia. St. Petersburg: SPb GETU LETI; 2022. p. 134–139. (In Rus.).
2. Chernyshenko A. A., Kamenskikh Yu. I. Vacuum system of Watt-balance: development aspects. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2021;17(4):5–12. (In Rus.) <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2021-17-4-5-12>
3. Chernyshenko A. A. «Standard on the table» – a new reality in the context of global transformations of the International System of Units. *LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science*. 2022;15(2):5–22. <https://doi.org/10.32603/2071-8985-2022-15-2-5-22>
4. Chernyshenko A. A. Theoretical and practical issues of standard development for verification and calibration of gas flow measures in vacuum. St. Petersburg: Editorial Office Paradigm; 2020. 176 p.
5. Pipko A. I., Pliskovsky V. Ya., Korolev B. I., Kuznetsov V. I. Fundamentals of vacuum technology: Textbook for Electron Technical Schools. Devices. Moscow: Energoizdat; 1981. (In Rus.).
6. Chernyshenko A. A. On the history of metrology research in the area of the gas flow in vacuum. *Paradigm: philosophical and cultural almanac*. 2016;23:140–148. (In Rus.).
7. Kudryavtsev P. S. Evangelista torricelli. Moscow: Znanie; 1958. (In Rus.).
8. Lebedev V. I. Historical experiments in physics: Scientific edition. Moscow, Leningrad: ONTI; 1937. 311 p. (In Rus.).
9. Liozzi M. History of physics (Russ. ed.: Burstein E. L.). Moscow: Mir, 1970. (In Rus.).
10. Stoletov A. G. Essays on the development of our information about gases: Collected works. Moscow, Leningrad: 1941. (In Rus.).
11. Groshkovsky Ya. High vacuum technique (Russ. ed.: Bulat V. L., Bulat E. L.). Moscow: Mir; 1975. (In Rus.).
12. Levin G. Fundamentals of vacuum technology (Russ. ed.: Shparo N. B., Yampolsky A. M.) Moscow: Energiya; 1969.
13. Cheffi E. L. Theory of electronic lamps: textbook. (Russ. ed.: Cheffi E. L., Nikitin N. A.). Moscow: Svyaztekhnizdat; 1937.
14. Borovik S. A. Two new high-resolution pumps. *Journal of the Russian Physico-Chemical Society Part of Physics*. 1913;45(8);2. (In Rus.).
15. Borovik S. A., Pavlov V. I. Obtaining a luminous discharge in a gas at small potential differences. Petrograd: Pechatnyi trud; 1915. (In Rus.).
16. Katzenelenbogen M. E., Vlasov V. N. Handbook of a machine shop worker. Moscow: Mashinostroenie; 1984. 239 p. (In Rus.).
17. Kelly M. J. Oliver Ellsworth Buckley (1887–1959): Biographical memoir. Washington: National academy of sciences; 1964. 34 p.
18. Dushman S. Scientific foundations of vacuum technique (Russ. ed.: Menshikova M. I.). Mir; 1964. 715 p.
19. Knudsen M. The Kinetic theory of gases. some modern aspects. London: MethuenL; 1934.
20. Yeryukhin A. V. Fundamentals of vacuum measurements. Moscow: Mashinostroenie; 1977. 40 p. (In Rus.).
21. Ershov B. D., Popov N. G., Saksagansky G. L. Methods of analysis of molecular flows. Rotaprint. Leningrad: NIIEFA; 1979. 64 p. (In Rus.).
22. Saksagansky G. L. Molecular flows in complex vacuum structures. Moscow: Atomizdat; 1980. 216 p. (In Rus.).
23. Rozanov L. N. Vacuum technology: Textbook for Universities in the specialty vacuum technology. Moscow: Vysshiaia shkola; 1990. 320 p. (In Rus.).
24. Kuzmin V. V., Alyaev V. A. Vacuum measurement technique: monograph. Kazan: KSTU; 2009. 299 p. (In Rus.).
25. Gorobei V. N., Izrailov E. K., Kuvandykov R. E., Fomin D. M., Chernyshenko A. A. New state primary standard GET 49–2016 of reproduction pressure unit in range 10^{-6} – 10^3 Pa. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018;387(1):012023. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/387/1/012023>
26. Andronov I. V., Gorobei V. N., Izrailov E. K., Kuvandykov R. E., Lobashev A. A., Chernyshenko A. A. Membrane-capacitive transducer with compensation for the primary standard of pressure. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018;387(1):012002. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/387/1/012002>
27. Chernyshenko A. A. On the issue of the development of the metrological support system in the field of vacuum measurements at the present time. 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. 107–114. (In Rus.).

28. Kuvandikov R. E., Chernyshenko A. A., Teteruk R. A., Gorobej V. N., Garshin A. Y. Method for measuring low absolute gas pressure and device for its implementation. Patent RF, no. RU2749644 C1, 2021. (In Rus.).
29. Gorobej V. N., Chernyshenko A. A. Static expansion method based on a membrane-capacitive vacuum gauge. 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. 67–69. (In Rus.).
30. Fomin D. M., Chernyshenko A. A. vacuum reduction unit for the state primary special standard of absolute pressure units in the range of $1 \times 10^{-6} - 1 \times 10^3$ Pa. In: *Proceedings of the XII International Scientific and Technical Conference Vacuum equipment, materials and technology*; 11–13 April, 2017; Moscow, Russia. Moscow: OAO NIIVT im. S. A. Vekshinskogo; 2017. p. 67–71. (In Rus.).
31. Chernyshenko A. A. The system of metrological provision of the Russian Federation in the field of measurement of gas flows in a vacuum and its future development. In: *Proceedings of the 28th All-Russian Conference with International Participation Vacuum Technique and Technology – 2021*; 21–24 June 2021; St. Petersburg, Russia. St. Petersburg: SPb GETU LETI; 2021. p. 128–133. (In Rus.).
32. Senatov D. E., Chernyshenko A. A. Universal intelligent transportable standard of modular type for verification and calibration of measuring instruments of low absolute pressures and vacuum. In: *Collection of Reports of the 47th Scientific and Technical Conference of Young Scientists and Specialists of Military Metrologists Actual Tasks of Military Metrology*; 2022. p. 253–257. (In Rus.).
33. Kangi R., Ongun B., Elkatmis A. The new UME primary standard for pressure generation in the range from 9×10^{-4} Pa to 10^3 Pa. *Metrologia*. 2004; 41: 251. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/41/4/005>
34. Kuvandikov R. E., Chernyshenko A. A. Modernization of the hardware and software complex of the national standards service in the area of pressure measurement technology for the calibration of vacuum gauges and development of a calibration simulator. In: *Proceedings of the 28th All-Russian Conference with International Participation Vacuum Technique and Technology – 2021*; 21–24 June 2021; St. Petersburg, Russia. St. Petersburg: SPb GETU LETI; 2021. p. 73–79. (In Rus.).
35. 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 Rus.).
36. 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 Rus.).
37. Moldover M. R. Can a pressure standard be based on capacitance measurements? *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*. 1998;103(2):167–175.
38. Jousten K., Hendricks J., Barker D., Douglas K., Eckel S., Egan P. et al. Perspectives for a new realization of the Pascal by optical methods. *Metrologia*. 2017;54(6):146–161.
39. Scherschligt J., Fedchak J. A., Barker D. S., Eckel S., Klimov N., Makrides C., Tiesinga E. Development of a new UHV/XHV pressure standard (Cold atom vacuum standard). *Metrologia*. 2017;54(6):125–132.
40. Gaiser C., Fellmuth B., Sabuga W. Primary gas-pressure standard from electrical measurements and thermophysical ab initio calculations. *Nature Physics*. 2020;16:177–180.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

ГЭТ 49-2016 Государственный первичный специальный эталон единицы давления для области абсолютных давлений в диапазоне $1 \cdot 10^{-6} \div 1 \cdot 10^3$ Па / институт хранитель ВНИИМ им. Д.И.Менделеева. Текст: электронный // Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений: официальный сайт. 2016. URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/12/items/397929>

ГОСТ 8.107-81. Государственная система обеспечения единства измерений. Государственный специальный эталон и государственная поверочная схема для средств измерений абсолютного давления в диапазоне от 1×10 в ст. минус 8 до 1×10 в ст. 3 Па = State system for ensuring the uniformity of measurements. State special standard and all-union verification schedule for means measuring absolute pressure within the range of 1×10 in minus 8 degree up to 1×10 in 3 degree Pa: государственный стандарт: утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 29 января 1981 г. № 322: издание официальное: дата введения 1982.07.01 / разработан Государственным комитетом СССР по стандартам. Москва: Государственный комитет СССР по стандартам, 1981. 10 с. Текст: непосредственный.

Об утверждении государственной поверочной схемы для средств измерения абсолютного давления в диапазоне от 10^{-1} до 10^7 Па: приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 06 декабря 2019 г. № 2900.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Александр Александрович Чернышенко – канд. техн. наук, руководитель лаборатории вакуумных измерений ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»
Российская Федерация, 190005,
г. Санкт-Петербург, Московский пр., 19
e-mail: vacuum@vniim.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aleksandr A. Chernyshenko – Cand. Sci. (Eng.), Head of Vacuum Measurement Laboratory, D. I. Mendeleyev Institute for Metrology (VNIIM)
19 Moskovskiy ave., St. Petersburg
190005, Russia
e-mail: vacuum@vniim.ru