

ОРИГИНАЛЬНЫЕ СТАТЬИ / ORIGINAL PAPERS

■ ЭТАЛОНЫ / MEASUREMENT STANDARDS

DOI: 10.20915/2077-1177-2021-17-4-5-12

УДК 006.91:531.751.3:53.089.68

ВАКУУМНАЯ СИСТЕМА ВАТТ-ВЕСОВ: АСПЕКТЫ РАЗРАБОТКИ

© А. А. Чернышенко, Ю. И. Каменских

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева»
(ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»), г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
e-mail: vacuum@vniim.ru, Y. I. Kamenskikh@vniim.ru

Поступила в редакцию – 28 августа 2021 г., после доработки – 10 октября 2021 г.

Принята к публикации – 29 октября 2021 г.

В статье рассматриваются вопросы, связанные с разработкой вакуумной системы Ватт-весов для создаваемого первичного эталона килограмма РФ. Авторы, опираясь на общепринятые методики расчета вакуумных систем, приводят перечень необходимых данных для разработки вакуумной системы создаваемого эталона килограмма РФ. В статье показаны основные этапы теоретических и практических научно-исследовательских работ, проведенных во ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» с использованием вакуумного компаратора ССЛ 1007 из состава государственного первичного эталона единицы массы – килограмма ГЭТ 3–2020, направленных на разработку вакуумной системы создаваемого эталона килограмма – Ватт-весов. Приведены результаты исследований, которые позволяют выполнить разработку вакуумной системы Ватт-весов.

Ключевые слова: государственный первичный эталон, единица массы, килограмм, вакуумный компаратор, Ватт-весы, методики расчета вакуумных систем, вакуумные измерения

Ссылка при цитировании:

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>.

For citation:

Chernyshenko A. A., Kamenskikh Yu. I. Vacuum system of Watt-balance: development aspects. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2021;17(4): 5–12. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2021-17-4-5-12> (In Russ.).

VACUUM SYSTEM OF WATT-BALANCE: DEVELOPMENT ASPECTS

© Alexander A. Chernyshenko, Yuriy I. Kamenskikh

D. I. Mendeleev Institute for Metrology (VNIIM), Saint Petersburg, Russian Federation
e-mail: vacuum@vniim.ru, Y. I. Kamenskikh@vniim.ru

Received – 28 August, 2021. Revised – 10 October, 2021.

Accepted for publication – 29 October, 2021.

This paper considers issues related to the development of the vacuum system of Watt-balance for the newest Russian Federation primary standard of the kilogram. The authors give a list of the necessary data for the development of the vacuum system of the newest Russian Federation kilogram mass standard, relying on the generally accepted methods of vacuum systems calculation. This paper shows the main stages of theoretical and practical research work conducted in D. I. Mendeleev Institute for Metrology (VNIIM) with the use of the vacuum mass comparator Sartorius CCL 1007 from the composition of the state primary measurement standard of mass unit – kilogram GET 3–2020, aimed at developing a vacuum system for the newest standard of the kilogram – Watt-balance. The presented results of the research allow for the development of the vacuum Watt-balancing system.

Keywords: state primary measurement standard, mass unit, kilogram, vacuum mass comparator, watt-balance, calculation methods for vacuum systems, vacuum measurements

Введение

В настоящий момент времени метрологи различных стран сосредоточили свои усилия на создании первичных эталонов, работающих на новых принципах измерений, которые опираются на фундаментальные физические константы. Прежде всего это связано с пересмотром системы единиц СИ, произошедшим в 2018–2019 гг. [1]. По результатам работы XXVI Генеральной конференции по мерам и весам¹ 20 мая 2019 г. вступили в действия новые определения таких физических величин, как ампер, килограмм, кельвин и моль. Следует отметить тот факт, что многие метрологически развитые страны (США [2], Франция [3], Великобритания [4], Южная Корея [5] и другие [6]) готовились к этому событию и уже имели национальные эталоны, которые соответствуют принятым определениям. В России также приступили к работам, связанным с созданием новейших первичных эталонов. Так, например, во ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» в настоящий момент ведутся научно-исследовательские работы, направленные на создание новейшего первичного эталона килограмма РФ. В соответствии с новой концепцией,

единицу массы будут определять через постоянную Планка, используя уже имеющиеся эталонные значения длины и времени. В этом и состоит отличие определения «нового» килограмма от «старого», который определялся как единица массы, равная массе международного прототипа килограмма, хранимого в Международном бюро мер и весов во Франции. С целью реализации нового определения килограмма во ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» были проведены исследовательские работы, направленные на создание Ватт-весов². Подобные весы в качестве первичных эталонов единицы массы эксплуатируются в таких странах, как США, Франция и ряде других [2–6]. Отметим, что взвешивание при помощи Ватт-весов производится в вакууме, а значит, задача проектирования и разработки вакуумной системы Ватт-весов является важной и актуальной. Качество разработки любой вакуумной системы, прежде всего, зависит от качества выполненного расчета и исходных

¹ Resolution 1 of the 26th CGPM (2018) // Bureau International des Poids et Mesures [website]. URL: <https://www.bipm.org/en/committees/cg/cgpm/26-2018/resolution-1>

² Ватт-весы, или весы Киббла – электромеханический прибор, предназначенный для установления соотношения между электрической мощностью и массой. Использовались с середины 1970-х гг. для измерения величины постоянной Планка, в настоящий момент времени используются для определения килограмма. Весы посмертно были названы в честь изобретателя Б. Киббла.

данных для него: необходимая степень вакуума, время выхода на рабочий режим, материалы, используемые в вакуумной системе, и др.

Примечательно, что данные для расчета вакуумной системы на основании изученных публикаций получить невозможно, поскольку эти публикации призваны ознакомить читателя с достижениями в области измерений массы, а не с этапами проектирования вакуумных систем. Как следствие, в большинстве публикаций, посвященных новейшим эталонам, отсутствует информация о требованиях к вакуумной системе и необходимых для расчета вакуумной системы данных. Поэтому на данном этапе авторами была определена основная цель работы – определение исходных данных, необходимых для проектирования и расчета вакуумной системы разрабатываемого эталона килограмма РФ.

Теоретические аспекты проектирования вакуумных систем

В настоящий момент разработка и проектирование различных вакуумных систем в большинстве случаев являются инженерными и конструкторскими задачами. На сегодняшний день существует ряд общепринятых и опробованных методик расчета и проектирования вакуумных систем, таких как:

– традиционная методика расчета, базирующаяся на использовании усредненных параметров состояния разреженного газа [7, 8];

– метод угловых коэффициентов, при котором рассматривается поведение разреженного газа с позиций диффузного рассеяния равновесного потока газа стенками вакуумной системы, что позволяет провести формальную аналогию между уравнениями переноса молекулярных масс и лучистой энергии, а также широко использовать хорошо разработанный аппарат теории лучистого теплообмена для решения задач вакуумной техники [8–10];

– вероятностный метод, или метод статистических испытаний (метод Монте-Карло), суть которого состоит в моделировании некоторой случайной величины путем прослеживания большого количества траекторий молекул газа [8–10];

– интегрально-кинетический метод, предполагающий преобразование кинетических уравнений динамики разреженного газа в интегральную форму, которые имеют простой вид для молекулярного режима течения газа [9];

– метод эквивалентных поверхностей, состоящий в упрощении анализируемой вакуумной системы путем замены отдельных ее элементов некоторыми

поверхностями, газокинетически эквивалентными замещаемым элементам [9, 10].

Согласно этим методикам, для проекторочного расчета любой вакуумной системы необходимо иметь такие входные данные:

- принципиальная схема вакуумной системы;
- используемые в вакуумной системе материалы;
- количество и размеры фланцев для присоединяемого к вакуумной системе оборудования;
- предполагаемый объем вакуумной системы;
- рабочее давление вакуумной системы;
- начальное давление в вакуумной системе;
- суммарное технологическое газовыделение и натекание;
- время работы в стационарном режиме;
- время откачки в нестационарном режиме работы и др.

Авторы хотели бы сделать акцент на том, что вышеуказанные входные данные по результатам изучения публикаций о уже созданных в мире Ватт-весах определить невозможно, поскольку такая информация в изученных источниках отсутствует.

С целью уточнения требований к вакуумной системе разрабатываемого первичного эталона килограмма РФ, а также с целью разработки возможной конструкции вакуумной системы будущего эталона на базе измерительных возможностей ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» авторами был проведен ряд теоретических и экспериментальных исследований. Так, проведенные исследования, описанные в работе Ю. И. Каменских [11], позволили подтвердить повышение точности передачи единицы массы в десять раз – с $6 \cdot 10^{-9}$ кг до $6 \cdot 10^{-10}$ кг – за счет применения вакуумного компаратора CCL 1007 из состава государственного первичного эталона единицы массы – килограмма ГЭТ 3–2020³ с ценой деления 0,1 мкг и артефактов плавучести и сорбции при измерениях плотности воздуха. Общий вид вакуумного компаратора CCL 1007 приведен на рис. 1.

Схожесть по габаритам и ожидаемым характеристикам вакуумной системы компаратора CCL 1007 с вакуумной системой разрабатываемых Ватт-весов позволила провести измерения необходимых для расчета вакуумной системы разрабатываемых Ватт-весов параметров, таких как: предельное остаточное давление, величина суммарного технологического газовыделения и натекания и др.

³ ГЭТ 3–2020 Государственный первичный эталон единицы массы (килограмма) // Федер. информац. фонд по обеспеч. единства измерений [сайт]. URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/12/items/1385582>



Рис. 1. Вакуумный компаратор CCL 1007 (Sartorius, Германия) с вакуумной транспортной системой VTS
 Fig. 1. The vacuum mass comparator Sartorius CCL 1007 (Germany) with VTS (vacuum transfer system)

Материалы и методы

В ходе исследований вакуумной системы компаратора авторами были выполнены следующие работы.

1. Выбрана типовая принципиальная вакуумная схема разрабатываемого изделия (Ватт-весов) по аналогии с вакуумной системой вакуумного компаратора масс ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева», приведенная на рис. 2.

2. Проведено тщательное изучение существующей измерительной вакуумной камеры вакуумного компаратора масс, вследствие чего авторами было отмечено, что измерительная вакуумная камера изготовлена из алюминиевого сплава и имеет форму параллелепипеда. Камера имеет ряд разъемных соединений: нижнюю и верхнюю съемные крышки, стандартные вакуумные фланцы стандарта СТ СЭВ 298–76 условным диаметром 25 мм – 13 шт., условным диаметром 40 мм – 13 шт., стандартные вакуумные фланцы стандарта ISO-K, ISO-F условных диаметров 63 мм – 2 шт., условным диаметром 100 мм – 2 шт., условным диаметром 160 мм – 3 шт., условным диаметром 250 мм – 1 шт. и прямоугольный фланец-порт 100×150 мм – 1 шт. Уплотнения всех разъемных соединений выполнены из фторкаучука (Viton, FKM).

3. В ходе экспериментальных исследований вакуумной камеры был проведен ряд измерений суммарного технологического газовыделения и натекания при помощи вакуумметра из состава вакуумного компаратора CCL 1007. Результаты измерений приведены в табл. 1.

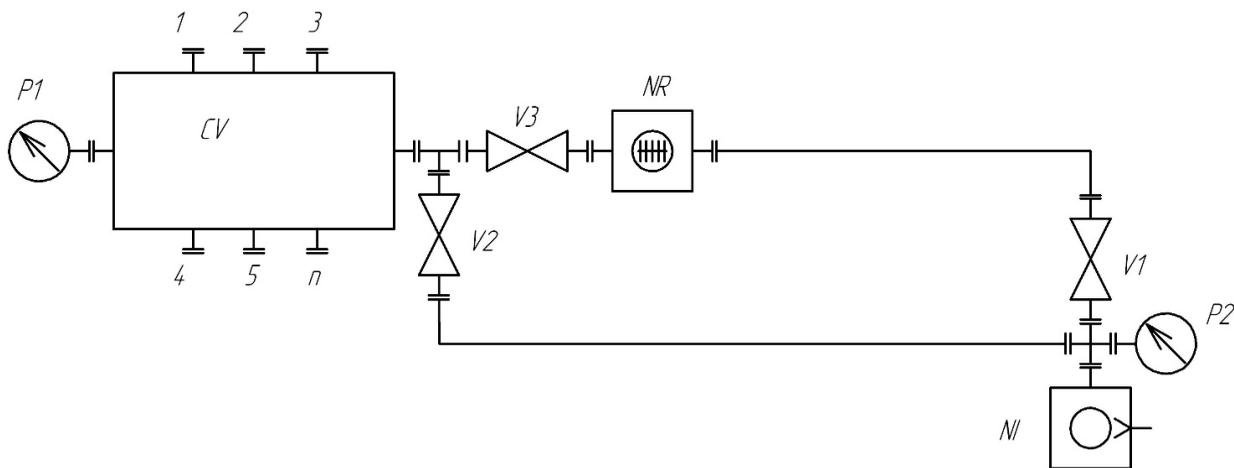


Рис. 2. Принципиальная вакуумная схема вакуумной системы разрабатываемого изделия. Где: 1,2-*n* – вакуумные фланцы для присоединения различного оборудования, *P1, P2* – вакуумметры, для измерения абсолютного давления, *V1-V3* – клапана вакуумные различного типа, *NI* – насос форвакуумный спиральный, *NR* – насос высоковакуумный турбомолекулярный
 Fig. 2. Basic vacuum diagram of the vacuum system of the product being developed. Where 1,2-*n* are vacuum flanges for connecting various equipment; *P1, P2* are vacuum gauges for measuring absolute pressure; *V1-V3* are various types of vacuum valves; *NI* is a spiral backing pump; *NR* is a high-vacuum turbomolecular pump

Таблица 1. Результаты измерений суммарного технологического газовыделения и натекания в вакуумной измерительной камере компаратора CCL 1007

Table 1. Measurement results of the total process gas evolution and leakage in the vacuum measuring chamber of the vacuum mass comparator Sartorius CCL 1007

Дата и время измерений	Период измерений, с	Давление в камере, Па	Технологическое газовыделение и натекание в вакуумной камере, Па/с или для 1 м ³ , Па·м ³ /с
17.03.2021 16:00	—	3,95	—
17.03.2021 21:00	18000	129	6,95·10 ⁻³
18.03.2021 11:50	53400	298	3,16·10 ⁻³
18.03.2021 16:00	15000	336	2,53·10 ⁻³
18.03.2021 19:20	12000	369	2,75·10 ⁻³
19.03.2021 11:00	52800	496	2,41·10 ⁻³
Средняя величина технологического газовыделения и натекания в вакуумной камере			3,56·10⁻³

По результатам измерений с целью проектировочного расчета будущей вакуумной системы Ватт-весов в качестве исходных данных для дальнейшего расчета была принята средняя величина технологического газовыделения и натекания—3,56·10⁻³ Па·м³/с.

4. Измерение предельного остаточного давления в вакуумной измерительной камере и его изменений во времени при помощи ионизационного вакуумметра AIGX-S № 115716526⁴, поскольку данная величина является основной характеристикой при выборе вакуумных насосов и на этапе расчета вакуумной системы может быть принята в качестве расчетного рабочего давления. Результаты измерений приведены в табл. 2.

⁴ Свидетельство о поверке № 2310/14845–2020 от 15.10.2020

Полученные экспериментальные результаты измерений позволили построить зависимость предельного остаточного давления от времени (рис. 3).

Результаты исследования

На основании полученных данных с целью последующего расчета будущей вакуумной системы Ватт-весов была принята минимальная величина предельного остаточного давления в вакуумной камере за 48 часов непрерывной откачки, равная 3,71·10⁻⁴ Па. Здесь следует отметить, что в период измерений предельного остаточного давления дважды производился технологический поворот стола вакуумного компаратора CCL 1007, находящегося в измерительной вакуумной камере. При этом не было отмечено изменений

Таблица 2. Результаты измерений измерение предельного остаточного давления

Table 2. Measurement results of the ultimate residual pressure

Дата и время измерений	Время с начала измерений, час.	Давление в камере, Па
19.03.2021 14:15	0	2,06·10 ⁻³
19.03.2021 15:00	0,75	1,34·10 ⁻³
19.03.2021 16:35	2,33	9,63·10 ⁻⁴
19.03.2021 16:50	2,58	9,27·10 ⁻⁴
19.03.2021 21:00	6,75	6,60·10 ⁻⁴
20.03.2021 19:15	29,00	4,18·10 ⁻⁴
21.03.2021 14:00	47,75	3,71·10 ⁻⁴

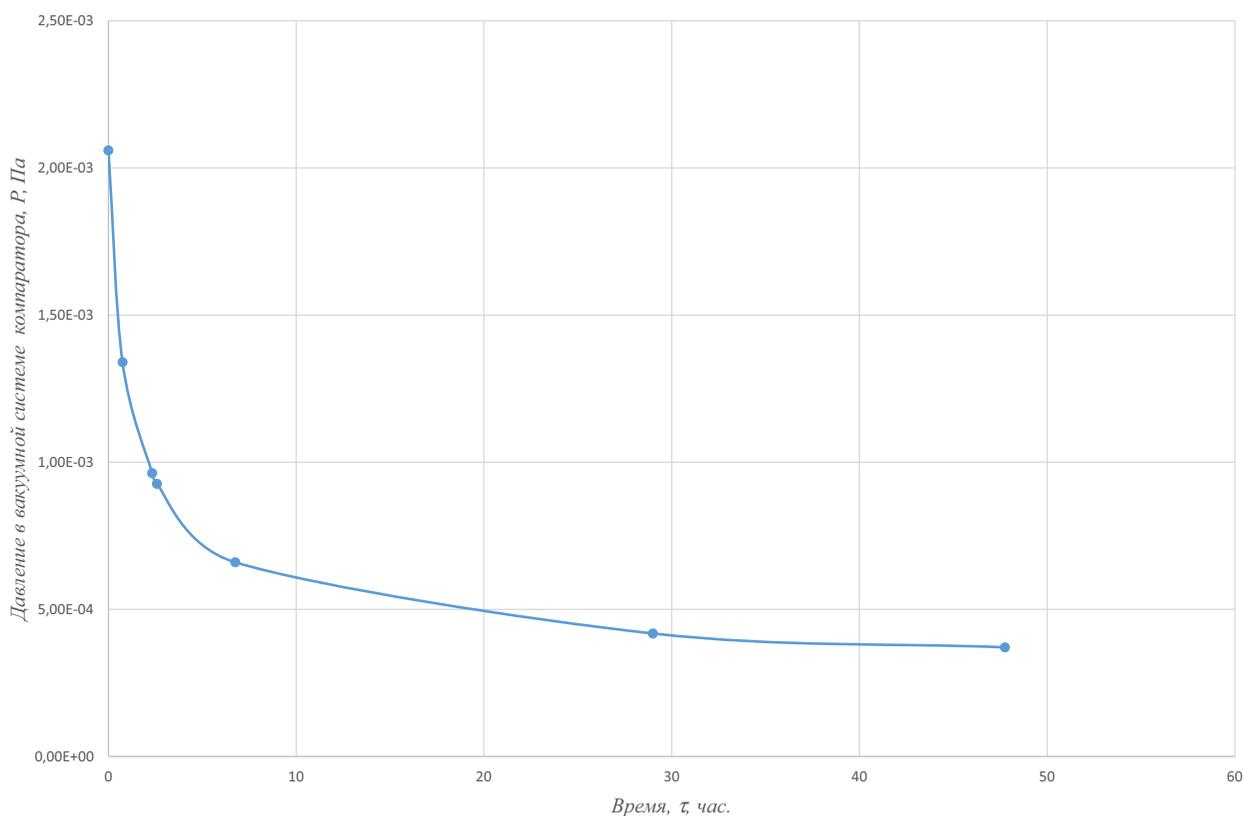


Рис. 3. Зависимость предельного остаточного давления от времени откачки

Fig. 3. Dependence of the ultimate residual pressure on the pump-down time

предельного остаточного давления в измерительной вакуумной камере.

Полученные результаты и другие имеющиеся входные данные для расчета вакуумной системы разрабатываемых Ватт-весов представлены на табл. 3.

Заключение

Проведенные исследования позволили авторам сформулировать ряд требований и исходных данных, необходимых для проекторочного расчета и последующего конструирования вакуумной системы

Таблица 3. Исходные данные для расчета вакуумной системы разрабатываемых Ватт-весов РФ

Table 3. Initial data for calculating the vacuum system of the developed Watt-balance of the Russian Federation

Наименование характеристики	Обозначение	Значения
Объем вакуумной камеры разрабатываемых Ватт-весов	V	$\leq 1 \text{ м}^3$
Начальное давление в вакуумной камере Ватт-весов	P_n	$1 \cdot 10^5 \text{ Па}$
Рабочее давление в вакуумной камере Ватт-весов	P	$\leq 1 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$
Суммарное технологическое газовыделение и натекание	Q_{Σ}	$3,56 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{м}^3/\text{с}$
Время работы Ватт-весов в стационарном режиме	τ_c	48 часов
Время откачки в нестационарном режиме работы	τ_n	48 часов

разрабатываемого первичного эталона килограмма РФ, который будет воспроизводить единицу массы через постоянную Планка и эталонные значения длины и времени.

Технически эталон будет представлять из себя високоточные Ватт-весы. Полученные результаты позволяют приступить к расчету вакуумной системы разрабатываемых Ватт-весов. В ходе дальнейшего проектирования и расчета запланированы следующие этапы.

1. Выбор материалов, которые будут использоваться для создания вакуумной системы эталона килограмма на основе Ватт-весов.

2. Проектировочный расчет вакуумной системы Ватт-весов в стационарном режиме работы с целью выбора откачного оборудования, вакуумной арматуры и определения размеров соединительных трубопроводов из условия обеспечения заданного рабочего давления в вакуумной камере Ватт-весов.

3. Проектировочный расчет вакуумной системы Ватт-весов в нестационарном режиме работы с целью выбора откачных средств, вакуумной арматуры и размеров трубопроводов из условия обеспечения заданного времени откачки от начального до рабочего давления.

4. Проверочный расчет вакуумной системы Ватт-весов с целью определения распределения давлений

в разрабатываемой вакуумной системе и уточнения проектировочных расчетов.

5. Подготовка технического задания на изготовление вакуумной системы разрабатываемого эталона килограмма РФ.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках научно-исследовательской работы «Исследование путей создания электроизмерительной, механической и вакуумной системы ватт-весов и построения на основе ватт-весов первичного эталона килограмма», шифр «Баланс-ЭМВ».

Авторы выражают признательность Чубанову Александру Александровичу за оказанную помощь при переводе метаданных статьи.

Вклад соавторов

Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Все измерения проводились с использованием оборудования ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева».

ЛИТЕРАТУРА

1. Международная система единиц (SI). 9-е изд. (Resolution 1 of the 26th CGPM (2018)) : перевод с англ. / под ред. А. Б. Дятлева [и др.]. СПб. ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева». 2019. 100 с.
2. The Design and Development of a Tabletop Kibble Balance at NIST / L. S. Chao [et al.] // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2019. Vol. 68. No. 6. Pp. 2176–2182. <https://doi.org/1109/TIM.2019.2901550>
3. A determination of the Planck constant using the LNE Kibble balance in air / M. Thomas [et al.] // Metrologia. 2017. Vol. 54. No. 4. Pp. 468. <https://doi.org/10.1088/1681-7575/aa7882>
4. Berry J., Webster E., Robinson I. NPL Kibble balance bifilar coil design and evaluation. XXII IMEKO World Congress, Belfast, 3–6 September 2018 // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1065. No. 042049. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1065/4/042049>
5. Realization of the kilogram using the KRIS Kibble balance / D. Kim [et al.] // Metrologia. 2020. Vol. 57. No. 5. P. 055006. <https://doi.org/10.1088/1681-7575/ab92e0>
6. Robinson I. A., Schlamminger S. The watt or Kibble balance: a technique for implementing the new SI definition of the unit of mass // Metrologia. 2016. Vol. 53. A46–A74. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/53/5/A46>
7. Дэшман С. Научные основы вакуумной техники: пер. с англ. / под ред. М. И. Меньшикова. М.: Мир, 1964. 715 с.
8. Розанов Л. Н. Вакуумная техника: учебник для вузов по специальности «Вакуумная техника». 2-е изд., доп. и пер. М.: Высшая школа. 1990. 320 с.
9. Ершов Б. Д., Попов Н. Г., Саксаганский Г. Л. Методы анализа молекулярных потоков. Ротапринт НИИЭФА. 1979. 64 с.
10. Нестеров С. Б., Васильев Ю. К., Андросов А. В. Методы расчета вакуумных систем. М.: МЭИ. 2004. 373 с.
11. Каменских Ю. И., Снегов В. С. Эталоны-копии единицы массы: калибровка 2020 года с применением вакуумного компаратора CCL 1007 // Эталоны. Стандартные образцы. 2021. Т. 17. № 2. С. 59–71. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2021-17-2-59-71>

REFERENCE

1. SI Brochure: The International System of Units (SI). 2019.
2. Chao L., Seifert F., Haddad D., Stirling J., Newell D., Schlamminger S. The Design and Development of a Tabletop Kibble Balance at NIST. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2019;68(6):2176–2182. <https://doi.org/10.1109/TIM.2019.2901550>
3. Thomas M., Ziane D., Pinot P., Karcher R., Imanaliev A., Santos F. P. D. et al. A determination of the Planck constant using the LNE Kibble balance in air. Metrologia. 2017;54(4):468. <https://doi.org/10.1088/1681-7575/aa7882>

4. Berry J., Webcter E., Robinson I. NPL Kibble balance bifilar coil design and evaluation. XXII IMEKO World Congress, Belfast, 3–6 September 2018. Journal of Physics: Conference Series. 2018;1065:042049. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1065/4/042049>
5. Kim D., Kim M. H., Seo M., Woo B.-C., Lee S., Kim J.-A. et al. Realization of the kilogram using the KRISS Kibble balance. Metrologia. 2020;57(5):055006. <https://doi.org/10.1088/1681-7575/ab92e0>
6. Robinson I. A., Schlamminger S. The watt or Kibble balance: a technique for implementing the new SI definition of the unit of mass. Metrologia. 2016;53(6): A46–A74. doi:10.1088/0026-1394/53/5/A46
7. Dushman S. Scientific foundations of vacuum technology (Russ. ed.: Menshikov M. I. Scientific foundations of vacuum technology. Mir publ.; Moscow: 1964). (In Russ.).
8. Rozanov L. N. Vacuum Technique: second edition. Vysshaya shkola; Moscow: 1990. 320 p. (In Russ.).
9. Ershov B. D., Popov N. G., Saksaganskiy G. L. Molecular flow analysis methods. Rotaprint NII EFA: 1979. (In Russ.).
10. Nesterov S. B., Vasiliev Yu. K., Androssov A. V. Methods for calculating vacuum systems. MEI; Moscow: 2004. (In Russ.).
11. Kamenskikh Yu. I., Snegov V. S. Reference standards-copies of mass unit: calibration 2020 using vacuum comparator CCL 1007. Measurement Standards. Reference Materials. 2019;16(1):59–71. DOI 10.20915/2077-1177-2020-16-1-59-71 (In Russ.).

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

Юрий Игоревич Каменских – руководитель сектора государственных эталонов в области измерений массы ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева».
Российская Федерация, 190005,
г. Санкт-Петербург, Московский пр., 19.
e-mail: Y. I. Kamenskikh@vniim.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Aleksandr A. Chernyshenko – PhD, Head of the Vacuum Measurement Laboratory, D. I. Mendeleev Institute for Metrology (VNIIM)
19 Moskovskiy ave., St. Petersburg,
190005, Russian Federation
e-mail: vacuum@vniim.ru

Yurii I. Kamenskikh – Head of Group, Mass Laboratory, D. I. Mendeleev Institute for Metrology (VNIIM)
19 Moskovskiy ave., St. Petersburg,
190005, Russian Federation
e-mail: Y. I. Kamenskikh@vniim.ru

