

ЭТАЛОНЫ

Научная статья


УДК 681.269.99

<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-2-23-30>



Перспективы развития системы обеспечения единства измерений массы на основе постоянной Планка в диапазоне малых масс (менее 1 г)

К. В. Чекирда  

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

Аннотация: Статья рассматривает перспективы развития систем измерения массы в диапазоне малых масс (менее 1 г) на основе постоянной Планка. Основное внимание уделено новым методам измерений, включая ватт-весы с электромагнитной и электростатической компенсацией силы тяжести. Эти системы основаны на фундаментальных физических принципах и предоставляют возможность избежать накопления погрешностей, характерных для традиционных методов передачи единицы массы через гири. Автор подробно описывает принципы работы ватт-весов, в том числе особенности их конструкции, такие как использование лазерных интерферометров для измерения перемещений и систем управления напряжением.

Статья подчеркивает актуальность разработки отечественных измерительных систем малых масс в Российской Федерации, что обусловлено необходимостью повышения точности измерений в таких областях, как аналитическая химия, биотехнологии и нанотехнологии. Отмечается, что переход на методы, основанные на фундаментальных физических константах, позволит существенно улучшить метрологическое обеспечение, минимизировать погрешности и создать новое поколение весового оборудования.

Работы, проводимые во ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева», направлены на разработку и исследование систем измерения малых масс на новых принципах, которые не уступают по характеристикам лучшим зарубежным аналогам. Автор выделяет важность калибровки таких систем через эталоны электрических величин, что обеспечивает их надежность и достоверность.

Предлагаемые решения представляют собой значимый вклад в развитие метрологии.

Ключевые слова: килограмм, постоянная Планка, ватт-весы (Киббл-весы), компаратор, электростатическая сила, измерительная система

Ссылка при цитировании: Чекирда К. В. Перспективы развития системы обеспечения единства измерений массы на основе постоянной Планка в диапазоне малых масс (менее 1 г) // Эталоны. Стандартные образцы. 2025. Т. 21, № 2. С. 23–30. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-2-23-30>

Статья поступила в редакцию 16.04.2025; одобрена после рецензирования 10.06.2025; принята к публикации 25.06.2025.


MEASUREMENT STANDARDS

Researched Article

Prospects for the Development of a System for Ensuring the Uniformity of Mass Measurements Based on the Planck Constant in the Low Mass Range (Less than 1 g)

Konstantin V. Chekirda  

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

 K. V. Chekirda@vniim.ru

Abstract: The article examines the prospects for the development of mass measurement systems in the low mass range (less than 1 g) based on the Planck constant. The focus is on new measurement methods, including watt balance with electromagnetic and electrostatic gravity compensation. These systems are based on fundamental physical principles and provide an opportunity to avoid the accumulation of errors specific to traditional methods of transferring a unit of mass through weights. The author describes in detail the principles of operation of watt balance, including design features such as the use of laser interferometers to measure displacements and voltage control systems.

The article emphasizes the relevance of developing domestic low mass measuring systems in Russia, which is due to the need to improve the accuracy of measurements in such areas as analytical chemistry, biotechnology and nanotechnology. It is noted that the transition to methods based on fundamental physical constants will significantly improve metrological support, minimize errors and create a new generation of weighing equipment.

The work carried out at VNIIM is aimed at developing and researching small mass measurement systems based on new principles that are not inferior in characteristics to the best foreign analogues. The author highlights the importance of calibrating such systems through standards of electrical quantities, which ensures their reliability and validity.

The proposed solutions represent a significant contribution to the development of metrology.

Keywords: kilogram, Planck's constant, watt balance (Kibble balance), comparator, electrostatic force, measuring system

For citation: Chekirda K. V. Prospects for the development of a system for ensuring the uniformity of mass measurements based on the Planck constant in the low mass range (less than 1 g). *Measurement Standards. Reference Materials*. 2025;21(2):23–30. (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2025-21-2-23-30>

The article was submitted 16.04.2025; approved after reviewing 10.06.2025; accepted for publication 25.06.2025.

Введение

Переопределение основной единицы Международной системы единиц (СИ) – килограмма – через фиксированное значение постоянной Планка позволило создавать и внедрять в метрологическую практику особый класс измерительного

оборудования, реализующий методы измерения массы, которые осуществляют связь с фундаментальной физической константой (ФФК) – постоянной Планка. К таким методам относятся:

1) метод сравнения электрической и механической мощности;

2) метод измерения рентгеновской плотности кристалла.

Измерительные системы, относящиеся к первому методу и функционирующие таким образом, что электрическая и механическая мощности могут быть приравнены друг другу, называются ватт-весами, или Киббл-весами (в честь британского физика и метролога Брайана Питера Киббла, который предложил идею эксперимента).

Совокупность средств измерений, реализующих второй метод, должна обеспечивать измерение объема сферы из монокристаллического кремния и определять количество атомов в измеренном объеме с известной атомарной массой [1].

Соответственно, современные методы воспроизведения массы могут обеспечить калибровку мер массы без сравнения с артефактом, например, национальной копией международного прототипа килограмма.

В документе Консультативного Комитета по Мерам и Весам «*Mise en pratique for the definition of the kilogram (2021)*» [2] закреплены основные методы реализации нового определения килограмма и процедуры его передачи с помощью первичных стандартов массы. Цепь прослеживаемости приведена на рис. 1.

В России ведутся работы по созданию измерительной системы на основе ватт-весов. Основные результаты этих разработок опубликованы в [3–5].

Важно отметить, что актуальность работ по созданию в России отечественной измерительной системы на основе ватт-весов обусловлена несколькими существенными обстоятельствами.

1. Россия, полноправный член Метрической конвенции с 1875 г., сохраняет за собой лидирующие позиции по подтвержденным измерительным возможностям.

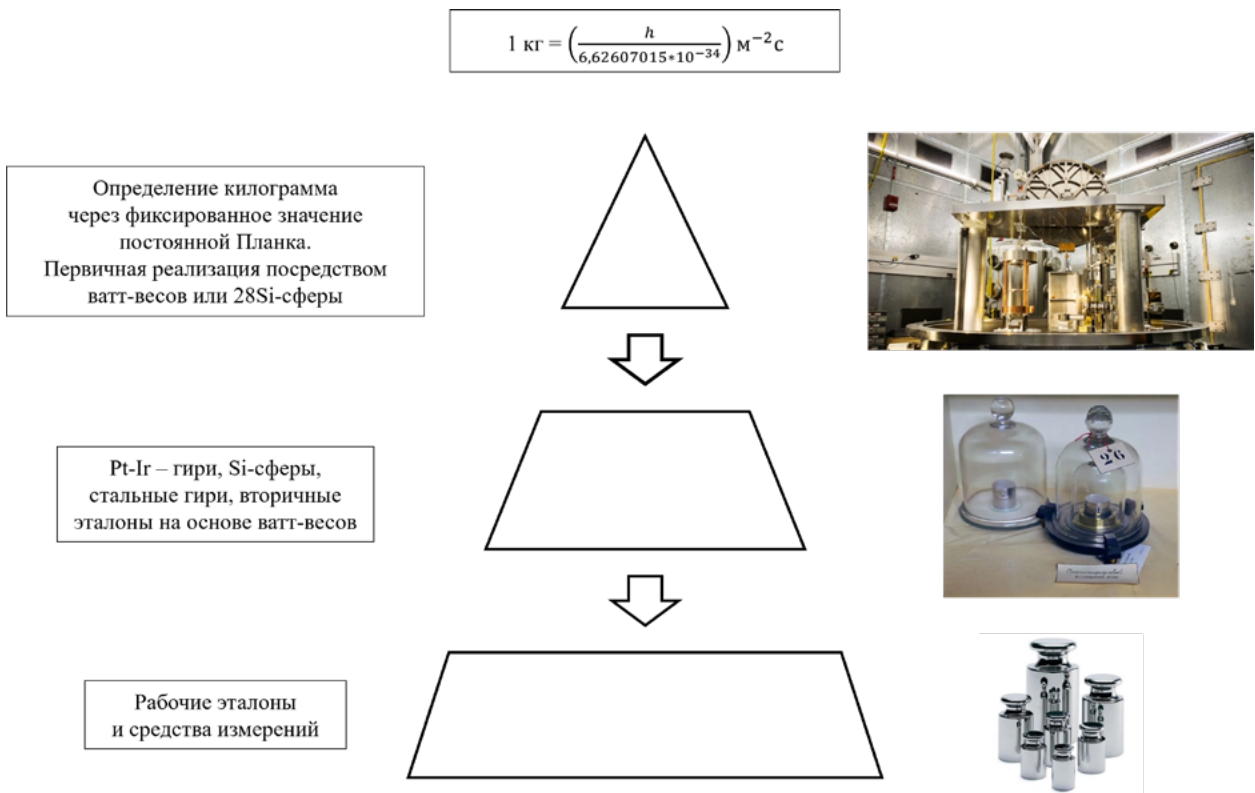


Рис. 1. Основные методы реализации нового определения килограмма и процедуры его передачи с помощью первичных стандартов массы согласно документу Консультативного Комитета по Мерам и Весам «*Mise en pratique for the definition of the kilogram (2021)*»

Fig. 1. Basic methods for implementing the new definition of the kilogram and the procedures for its transmission using primary mass standards according to the document of the Consultative Committee on Weights and Measures „*Mise en pratique for the definition of the kilogram (2021)*“

2. Россия проголосовала за принятие Решения 26-й Конференции по Мерам и Весам в 2018 г. о переходе на обновленную Международную систему единиц (SI), основанную на ФФК.

3. Федеральный закон № 102-ФЗ¹, который содержит гарантии защиты прав и законных интересов граждан, общества и государства от отрицательных последствий недостоверных результатов измерений, направлен на содействие развитию экономики России и научно-техническому прогрессу.

Цель настоящей статьи – рассмотреть перспективы развития систем измерения массы в диапазоне малых масс (менее 1 г) на основе постоянной Планка. Для этого предстоит исследовать и описать новые методы измерений – ватт-весы с электромагнитной и электростатической компенсацией силы тяжести.

Материалы и методы

Мотивация развития новых методов воспроизведения массы в диапазоне масс менее 1 грамм. В Российской Федерации система передачи единицы массы обеспечивается в соответствии с Государственной поверочной схемой² посредством гирь методом сравнения массы гирь на компараторах с прослеживаемостью к Государственному первичному эталону массы ГЭТ 3–2020. Основным документом, который устанавливает технические и метрологические требования к гирям, используемым в качестве эталонов для поверки весов и гирь более низкого класса точности, является ГОСТ OIML 111-1-2009³.

В настоящее время наивысшей относительной точностью обладает эталон-копия международного прототипа килограмма. Отечественная система передачи единицы массы в области малых масс носит «ступенчатый» характер, так что возникает потеря относительной точности измерений малых масс

по причине накапливания относительной погрешности при передаче от гири к гире. Анализ публикаций [6–8], посвященных новым методам взвешивания с прослеживаемостью к постоянной Планка, показывает: уже сегодня можно достичь существенного улучшения значений неопределенности измерений в области малых масс (менее 1 г). На рис. 2 приведены возможности измерений массы в Российской Федерации (по данным Международного бюро мер и весов (МБМВ)) в сравнении с новыми методами измерений.

Рис. 2 иллюстрирует, что создание и внедрение в метрологическую практику измерительных систем массы на новых принципах (ватт-весы с электромагнитной компенсацией силы тяжести и Вольтовы весы с электростатической компенсацией силы тяжести) может уже на первых этапах применения существенно улучшить характеристики при передаче единицы массы первичным стандартам в диапазоне от менее 0,1 мг до 1 г.

Стоит отметить, что проблема повышения точности в области малых масс в последнее время обостряется. Например, в аналитической химии при разработке и исследовании особо чистых веществ необходимо измерять малые массы навесок анализируемого продукта в граммах с относительной точностью не хуже 4-го десятичного знака [9]. В то время как, согласно Постановлению правительства РФ⁴, для некоторых веществ крупным объемом считается масса сухого остатка после высушивания от 0,000 1 г.

Соответственно, используемые в настоящее время методы не могут обеспечивать потребности государства и общества, которые, в свою очередь, требуют разработки и внедрения методов, основанных на новых физических принципах. Кроме того, требуется разработка новых нормативно-технических решений для

¹ Об обеспечении единства измерений : Федеральный закон от 26.06.2008 г. № 102-ФЗ.

² Об утверждении Государственной поверочной схемы для средств измерений массы : Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 04 июля 2022 г. № 1622.

³ ГОСТ OIML 111-1-2009 ГСИ. Гири классов E1, E2, F1, F2, M1, M1–2, M2, M2–3 и M3.

⁴ Об утверждении значительного, крупного и особо крупного размеров наркотических средств и психотропных веществ, а также значительного, крупного и особо крупного размеров для растений, содержащих наркотические средства или психотропные вещества, либо их частей, содержащих наркотические средства или психотропные вещества, для целей статей 228, 228.1, 229 и 229.1 Уголовного кодекса Российской Федерации : Постановление Правительства РФ от 01.10.2012 № 1002.

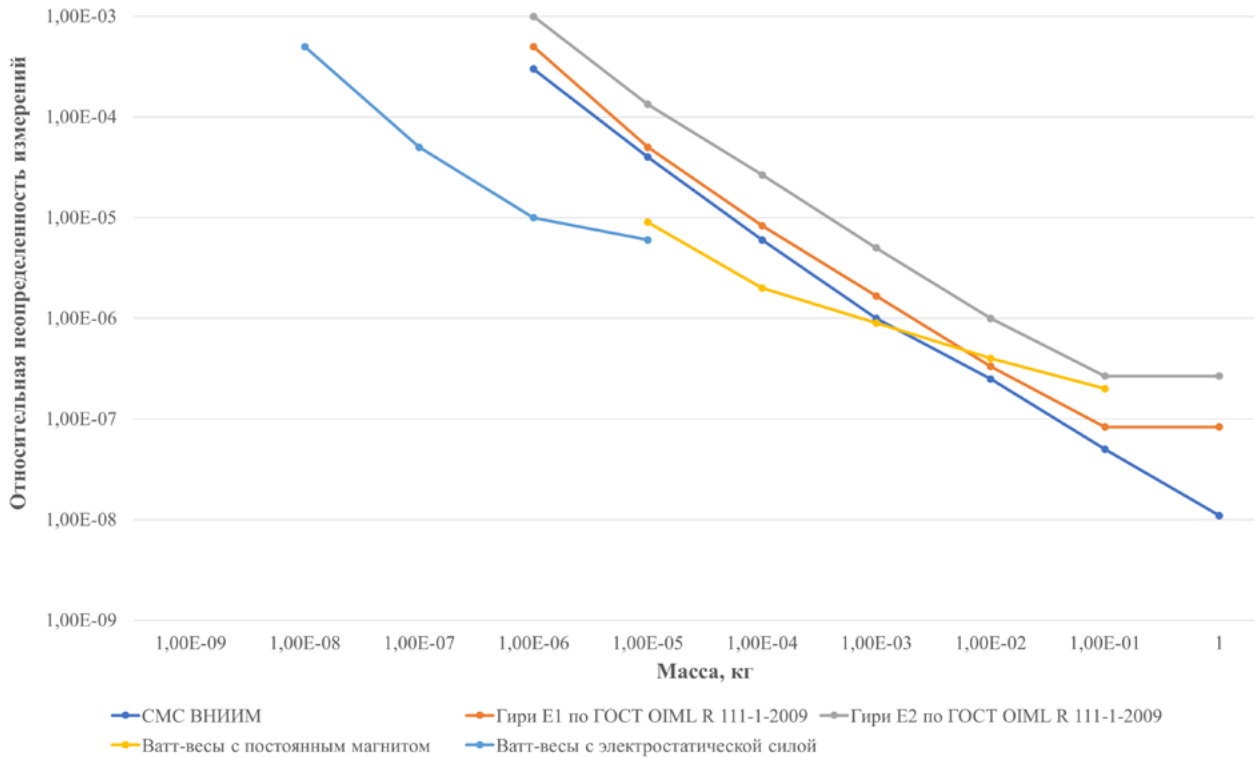


Рис. 2. Возможности измерений массы в Российской Федерации (график составлен по данным Международного бюро мер и весов)

Fig. 2. Mass measurement capabilities in the Russian Federation (the chart is based on data from the International Bureau of Weights and Measures)

метрологического обеспечения средств измерений массы в Российской Федерации.

Общие принципы построения новой системы обеспечения единства измерений массы на основе постоянной Планка в диапазоне малых масс (менее 1 г). Точные измерения малых масс и сил необходимы для различных приложений в таких областях, как разработка и производство биотехнологий, мониторинг частиц в окружающей среде, атомно-силовая микроскопия и других.

Одним из перспективных методов измерений малых масс является метод электростатической компенсации силы тяжести, соответствующий принципу ватт-весов. Этот метод, как и метод компенсации силы тяжести электромагнитной системой, требует измерения напряжения, тока и скорости, а также значения местного ускорения свободного падения. В отличие от электромагнитной системы ватт-весов, метод электростатической компенсации

требует стабильного и настраиваемого источника напряжения, а не источника тока.

Результаты и обсуждение

Рассмотрим общий принцип построения Вольтовых весов с электростатической компенсацией силы тяжести. Данное рассмотрение носит общий характер и не дает полную оценку всех влияющих факторов, однако дает понимание возможности реализации таких измерительных систем и показывает преимущества метода.

Сила, действующая на пластину плоскопараллельного конденсатора, описывается следующим образом:

$$F = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S U^2}{2d^2} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r \pi R^2 U^2}{2d^2},$$

где $\epsilon_0 = 8,8541878 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная; $\epsilon_r = 1$ – диэлектрическая проницаемость воздуха; S – площадь пластины;

R – радиус круглой пластины; U – напряжение на пластинах конденсатора; d – расстояние между пластинами.

Для технологичности сборки узла плоского конденсатора для ватт-весов с электростатической компенсацией силы тяжести предполагается, что зазор между пластинами будет реализован в диапазоне от 10 до 200 мкм. Механизм, обеспечивающий перемещение одной из пластин, должен быть максимально податливым по одной оси, совпадающей с направлением вектора действия силы тяжести, чтобы добиться максимальной чувствительности в режиме взвешивания, и максимально жестким по остальным пяти осям вращения и поступательного движения. Одним из вариантов конструкции могут быть ирисовые пружины, описанные в [10].

Для точного определения скорости перемещения возможно использовать лазерный интерферометр перемещений с неопределенностью измерений перемещения от 1 до 10 нм, а время интегрирования измерительной системы 10 мкс.

По силе вычисляется масса, которую эта сила уравновешивает. Для оценки принято нормальное ускорение свободного падения $g_0 = 9,80665 \text{ м/с}^2$.

В табл. 1 приведена масса в граммах для заданных радиусов и напряжений, расстояние между пластинами $d = 150 \text{ мкм}$.

Исходя из этого приближенного уравнения, используемого в виде модели измерений массы при помощи ватт-весов с электростатической компенсацией силы тяжести, можно приблизительно оценить точность метода измерений. Принимая неопределенность измерений расстояния между пластинами не хуже 10 нм, относительную неопределенность измерений

напряжения на пластинах конденсатора 10^{-5} , а неопределенность ускорения свободного падения 10^{-5} (10 мГал) [11] оценка неопределенности измерений массы равной, например, 5 мг получается не хуже $5 \cdot 10^{-4}$ мг.

Заключение

Прогресс средств измерений электромагнитных величин создал возможность реализовывать новые системы измерения массы через установление связи с фундаментальной физической константой – постоянной Планка. Для области малых масс появилась возможность создавать системы измерений, основанных на новых методах электромагнитной и электростатической компенсации силы тяжести с достаточно высокой точностью.

Очевидно, обе системы измерений массы могут быть калиброваны на месте установки через калибровку каналов измерений величин, входящих в уравнение измерений. Достоверность измерений в этом случае может быть достигнута межлабораторными сравнительными испытаниями, где опорным значением принимается масса, определенная на Государственном первичном эталоне.

Методы измерения малых масс посредством ватт-весов с электромагнитным и электростатическим принципом компенсации силы тяжести явно могут дать существенное преимущество по сравнению с классическим методом через калибровку гирями. Развитие этих методов даст принципиально новое весовое оборудование, работоспособность которого можно контролировать по месту установки посредством калибровки через эталоны электрических величин.

Во ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» начаты работы по разработке и исследованию систем измерения малых масс на новых

Таблица 1. Масса для заданных радиусов и напряжений

Table 1. Mass for given radius and stresses

R/U	10 В	50 В	100 В	150 В
30 мм	$1,06 \cdot 10^{-5}$	$2,66 \cdot 10^{-4}$	$1,06 \cdot 10^{-3}$	$2,40 \cdot 10^{-3}$
40 мм	$1,42 \cdot 10^{-5}$	$3,54 \cdot 10^{-4}$	$1,42 \cdot 10^{-3}$	$3,19 \cdot 10^{-3}$
50 мм	$1,77 \cdot 10^{-5}$	$4,43 \cdot 10^{-4}$	$1,77 \cdot 10^{-3}$	$3,99 \cdot 10^{-3}$
60 мм	$2,13 \cdot 10^{-5}$	$5,31 \cdot 10^{-4}$	$2,13 \cdot 10^{-3}$	$5,31 \cdot 10^{-3}$

принципах. Результатом таких работ будет создание линейки отечественных весов на новых принципах, по своим характеристикам не уступающих лучшим зарубежным аналогам, разрабатываемым в настоящее время.

Благодарности: Автор выражает благодарность Анастасии Викторовне Миргородской за помощь в редактировании настоящей статьи.

Acknowledgments: The author expresses gratitude to Anastasia V. Mirgorodskaya for her assistance in editing this article.

Конфликт интересов: Автор является сотрудником учредителя журнала. Однако при написании рукописи статьи автор руководствовался соображениями научной ценности полученного материала и заявляет о беспристрастности оценки полученных данных.

Conflict of interest: The author is an employee of the journal's founder. However, when writing

the manuscript of the article, the author was guided by considerations of scientific value of the obtained material and declares the impartiality of the evaluation of the obtained data.

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

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

Финансирование: Автор не получал финансовую поддержку для проведения исследования, авторства и публикации этой статьи.

Funding: The author received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Realization of the kilogram by the XRCd method / K. Fujii [et al.] // *Metrologia*. 2016. Vol. 53, № 5. P. A19–A45. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/53/5/A19>
2. Mise en pratique for the definition of the kilogram in the SI // BIPM [website]. URL: <https://www.bipm.org/utls/en/pdf/si-mep/SI-App2-kilogram.pdf> (accessed: 01.01.2025).
3. Медведевских С. В., Чекирда К. В. Исследование макета ватт-весов с верхним пределом измерений 10 грамм // *Измерительная техника*. 2022. № 2. С. 28–33. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-2-28-33>
4. Чекирда К. В., Янковский А. А. Перспективы создания первичного эталона килограмма на основе ватт-весов // *Законодательная и прикладная метрология*. 2021. № 5 (173). С. 13–17.
5. Кривцов Е. П., Чекирда К. В., Янковский А. А. Современное состояние первичных эталонов в областях измерений геометрических, механических и связанных с ними величин // *Измерительная техника*. 2017. № 12. С. 23–27.
6. Milligram mass metrology using an electrostatic force balance / G. A. Shaw [et al.] // *Metrologia*. 2016. Vol. 53, № 5. P. A86–A94. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/53/5/A86>
7. Maintaining and disseminating the kilogram following its redefinition / M. Stock [et al.] // *Metrologia*. 2017. Vol. 54, № 6. P. S99–SS107, 2017. <https://doi.org/10.1088/1681-7575/aa8d2d>
8. Robinson I., Schlamminger S. The watt or Kibble balance: a technique for implementing the new SI definition of the unit of mass. *Metrologia*. 2016. Vol. 53, № 5. P. A46–A74. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/53/5/A46>
9. Крылов А. И., Михеева А. Ю., Ткаченко И. Ю. Контроль органических компонентов. Обеспечение прослеживаемости результатов измерений // *Контроль качества продукции*. 2017. № 11. С. 12–17.
10. Чекирда К. В., Янковский А. А., Лобашев А. А. Макет ватт-весов: математическое моделирование вертикальных направляющих на основе ирисовых пружин // *Измерительная техника*. 2022. № 11. С. 51–56. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-11-51-56>
11. Витушкин Л. Ф. Абсолютные баллистические гравиметры // *Гироскопия и навигация*. 2015. № 3 (90). С. 3–12. <https://doi.org/10.17285/0869-7035.2015.23.3.003-012>

REFERENCE

1. Fujii K., Bettin H., Becker P., Massa E., Rienitz O., Pramann A. et al. Realization of the kilogram by the XRCd method. *Metrologia*. 2016;53(5):A19–A45. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/53/5/A19>
2. Mise en pratique for the definition of the kilogram in the SI. Available at: <https://www.bipm.org/utls/en/pdf/si-mep/SI-App2-kilogram.pdf> (accessed: 01.01.2025).

3. Medvedevskih S. V., Chekirda K. V. Research on a watt-weights layout with an upper measurement limit of 10 grams. *Izmeritel'naya Tekhnika*. 2022;(2):28–33. (In Russ.). <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-2-28-33>
4. Chekirda K. V., Yankovsky A. A. Prospects for creating a primary kilogram standard based on watt-weights. *Legal and applied metrology*. 2021;5(173):13–17. (In Russ.).
5. Krivtsov E. P., Chekirda K. V., Yankovsky A. A. The modern state of primary measurement standards in the areas of measurement of geometric, mechanical and related quantities. *Measurement Techniques*. 2017;12:23–27. (In Russ.).
6. Shaw G. A., Stirling J., Kramar J. A., Moses A., Abbott P., Steiner R. et al. Milligram mass metrology using an electrostatic force balance. *Metrologia*. 2016;53(5):A86–A94. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/53/5/A86>
7. Stock M., Davidson S., Fang H., Milton M., de Mirandés E., Richard P. et al. Maintaining and disseminating the kilogram following its redefinition. *Metrologia*. 2017;54(6):S99–SS107. <https://doi.org/10.1088/1681-7575/aa8d2d>
8. Robinson I. Schlamminger S. The watt or Kibble balance: a technique for implementing the new SI definition of the unit of mass. *Metrologia*. 2016;53(5):A46–A74. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/53/5/A46>
9. Krylov A. I., Mikheeva A. Yu., Tkachenko I. Yu. Control of organic components. Ensuring traceability of measurement results. *Kontrol' kachestva produkcii*. 2017;11:12–17. (In Russ.).
10. Chekirda K. V., Yankovsky A. A., Lobashev A. A. Watt balance layout: mathematical modeling of vertical guides based on iris springs. *Izmeritel'naya Tekhnika*. 2022;(11):51–56. (In Russ.). <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-11-51-56>
11. Vitushkin L. F. Absolute ballistic gravimeters. *Gyroscopy and Navigation*. 2015;3(90):3–12. (In Russ.). <https://doi.org/10.17285/0869-7035.2015.23.3.003-012>

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Чекирда Константин Владимирович – канд. техн. наук, заместитель генерального директора ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»
190005, г. Санкт-Петербург, пр. Московский, 19
e-mail: K.V.Chekirda@vniim.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3462-1027>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Konstantin V. Chekirda – Cand. Sci. (Eng.), Deputy General Director, D. I. Mendeleev Institute for Metrology
19 Moskovsky ave., St. Petersburg, 190005, Russia
e-mail: K.V.Chekirda@vniim.ru
<https://orcid.org/0000-0003-3462-1027>