

ЭТАЛОНЫ

Обзорная статья

УДК 531.421:681.26:006.91

<https://doi.org/10.20915/2077-1177-2024-20-3-5-12>



Эталоны силы до 1 МН и выше

И. Ю. Шмигельский ✉

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева»,
г. Санкт-Петербург, Россия
✉ i.y.shmigelskiy@vniim.ru

Аннотация: Эталоны силы необходимы в обеспечении испытаний весоизмерительных и силоизмерительных датчиков, предназначенных для измерений и исследований больших нагрузок в ракетостроении, строительстве атомных электростанций, в испытаниях конструкционных материалов. Эталонные установки непосредственного нагружения имеются в распоряжении ведущих научно-исследовательских институтов России, Германии, США, Китая и Республики Корея.

Автор систематизировал и обобщил отечественный опыт применения эталонов силы прямого нагружения. Так, приводится обзор установки прямого нагружения ЭУ-100 из состава Государственного первичного эталона единицы силы ГЭТ 32–2011 Российской Федерации в диапазоне от 10 кН до 1 МН.

Проанализирован также зарубежный опыт в области воспроизведения единицы силы значением до 1 МН и выше. Так, оценен диапазон воспроизведения и состав грузов эталонной силовоспроизводящей установки прямого нагружения Физико-технического федерального института (РТВ, Германия), эталонной силовоспроизводящей установки прямого нагружения Национального института эталонов и технологий США (NIST, США), эталонной силовоспроизводящей установки прямого нагружения Института метрологии провинции Фуцзянь (FPIM, Китай) и эталонной силовоспроизводящей установки Корейского научно-исследовательского института эталонов и науки (KRISS, Республика Корея).

Статья представляет научный и практический интерес для специалистов в области воспроизведения единицы силы больших значений. Обобщенный опыт может стать основой для исследований в области совершенствования эталонов силы. Обзор адресован также преподавателям и студентам профильных дисциплин высшей школы.

Ключевые слова: эталон, измерения силы, поверка, группа динамометров, силовоспроизводящие машины

Ссылка при цитировании: Шмигельский И. Ю. Эталоны силы до 1 МН и выше // Эталоны. Стандартные образцы. 2024. Т. 20, № 3. С. 5–12. <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2024-20-3-5-12>

Статья поступила в редакцию 12.04.2024; одобрена после рецензирования 29.08.2024; принята к публикации 25.09.2024.

MEASUREMENT STANDARDS

Review article

Force Measurement Standards Up to 1 MN and Above

Ilya Y. Shmigelsky ✉

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

✉ i.y.shmigelskiy@vniim.ru

Abstract: The use of force measurements standards ensures testing of load and force sensors designed for measuring and studying large loads in rocket science, nuclear power plant construction, and testing of structural materials.

The article provides an overview of the State Primary Standard of force GET 32–2011 of the Russian Federation in the range up to 1 MN, and also analyzes international experience in the field of reproduction of the unit of force with a value above 1 MN.

The range of reproduction and composition of loads of the deadweight machine EU-100 from the composition of the State Primary Standard of force GET 32–2011 of the Russian Federation, deadweight machine of the Physical-Technical Federal Institute (PTB, Germany), deadweight machine of the National Institute of Standards and Technologies, deadweight machine of the Fujian Institute for Metrology (FJIM, China) and the deadweight machine of the Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS, Republic of Korea) were assessed.

The article is of scientific and practical interest to specialists in the field of reproduction of the unit of force of large values. The generalized experience can become the basis for research in the field of improving the standards of force. The review is also addressed to teachers and students of specialized disciplines of higher education.

Keywords: measurement standard, force measurements, verification, dynamometer group, force standard machine

For citation: Shmigelsky I. Y. Force measurement standards up to 1 MN and above. *Measurement Standards. Reference Materials*. 2024;20(3):5–12 (In Russ.). <https://doi.org/10.20915/2077-1177-2024-20-3-5-12>

The article was submitted 12.04.2024; approved after reviewing 29.08.2024; accepted for publication 25.09.2024.

Введение

В настоящее время в состав Государственного первичного эталона единицы силы ГЭТ 32–2011¹ входят установки прямого нагружения до 1 МН. Эталонные установки воспроизведения единицы силы прямого нагружения в диапазоне от 1 МН необходимы для обеспечения точности и надежности измерений и испытаний в различных областях науки и техники, таких отраслях, как машиностроительная, авиационная, космическая, военная и других, где требуются эталоны большого диапазона воспроизведения. В частности, применение таких эталонов обеспечивает испытания весоизмерительных и силоизмерительных датчиков, предназначенных для

измерений и исследований больших нагрузок в ракетостроении, строительстве АЭС, испытаниях конструкционных материалов. Основой совершенствования методов измерений больших значений силы является разработка новых эталонов.

Основной проблемой расширения диапазона воспроизведения свыше 1 МН для эталонов прямого нагружения является высокая ресурсоемкость работ, в особенности – возрастание технологических трудностей в их производстве и эксплуатации и значительный расход материалов, применяющихся в конструкции эталонов большого диапазона воспроизведения.

Цель данной статьи – представить обзор состава грузов и диапазонов воспроизведения единицы силы наиболее известных установок прямого нагружения, верхний предел воспроизведения которых равен или больше

¹ ГЭТ 32–2011 Государственный первичный эталон единицы силы.

1 МН, принадлежащих научно-исследовательским институтам России, Германии, США, Китая и Республики Корея.

По итогам обзора сделан вывод о целесообразности применения метода совокупных измерений в целях передачи единицы величины свыше диапазона воспроизведения эталонной силовоспроизводящей установки.

Обзор зарубежного опыта

Рассмотрим варианты реализации государственных первичных эталонов единицы силы различных стран мира.

США. Установка прямого нагружения (рис. 1) Национального института эталонов и технологий США (NIST)² способна воспроизводить значения силы в диапазоне от 222 кН (50 · 10³ фунтов-силы) до 4 448 кН (106 фунтов-силы) с дискретностью 222 кН. NIST располагает средствами для осуществления передачи единицы силы в диапазоне до 53 МН (12 · 10⁶ фунтов-силы). Такая возможность существует благодаря наборам эталонных динамометров. NIST имеет (а) группу из трех эталонных динамометров в диапазоне до 4 448 кН, каждый из которых откалиброван на установке прямого нагружения; (б) группу из четырех эталонных динамометров в диапазоне до 13 МН (3 · 10⁶ фунтов-силы), каждый из которых был откалиброван путем сравнения с группой из трех 4 448 кН эталонных динамометров. С помощью применения данных групп динамометров передача единицы силы в диапазоне свыше 4 448 кН осуществляется методом совокупных измерений. Стандартная

² NIST Лаборатория физических измерений.



Рис. 1. Фрагмент эталонной силовоспроизводящей установки прямого нагружения в диапазоне от 222 до 4 448 кН института NIST [1]

Fig. 1. Fragment of a reference dead weight installation for direct loading in the range from 222 to 4.448 kN from the NIST Institute [1]

неопределенность измерений в диапазоне от 4,5 до 13 МН составляет 1,7 кН. Относительная стандартная неопределенность измерений находится в диапазоне от 0,038 % в точке нагружения 4 448 кН до 0,013 % в точке нагружения 13 МН. Аналогично стандартная неопределенность составляет 5 и 5,9 кН в диапазонах от 13 до 40 МН и от 40 до 53 МН соответственно; относительная стандартная неопределенность измерений находится в диапазонах от 0,038 % в точке нагружения 13 МН до 0,013 % в точке нагружения 40 МН и в диапазоне от 0,015 % в точке нагружения 40 МН до 0,011 % в точке нагружения 53 МН [1].

Германия. У Физико-технического федерального института Германии (PTB) имеется установка прямого нагружения (рис. 2) в диапазоне от 10 кН до 2 МН в составе национального эталона силы с дискретностью 10 кН, укомплектованная 50 грузами, создающими усилие 10 кН (10 грузов), 20 кН (20 грузов), 50 кН (10 грузов) и 100 кН (10 грузов) [2]. Указанная комплектность дает возможность реализовывать воспроизведение двухсот различных значений силы. Особенностью данной установки является одновременное управление всем набором грузов, что позволяет изменять величину суммарного нагружения без необходимости промежуточного разгружения.

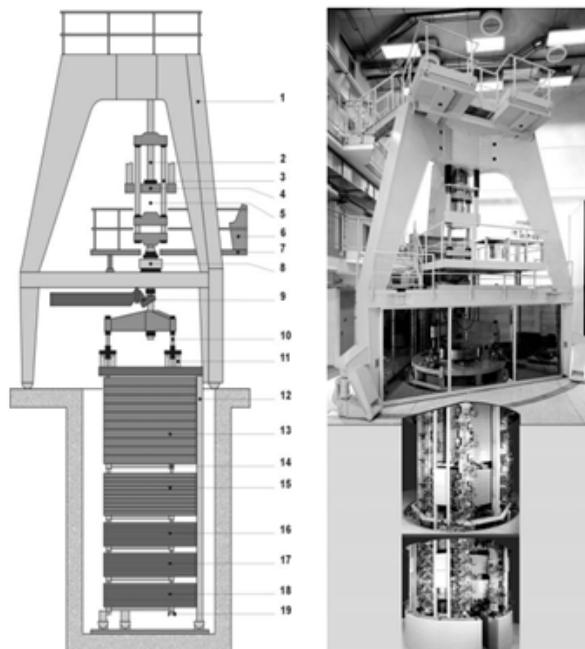


Рис. 2. Эталонная силовоспроизводящая установка прямого нагружения в диапазоне от 10 кН до 2 МН института PTB [2]

Fig. 2. Reference force-generating installation dead weight in the range from 10 kN to 2 MN of the PTB Institute [2]

Китай. Институт метрологии провинции Фуцзянь (FPIМ) имеет установку прямого нагружения в диапазоне от 10 кН до 2 МН (рис. 3), укомплектованную набором из 39 грузов, создающих усилие 10 кН (10 грузов), 20 кН (5 грузов), 30 кН (4 груза), 40 кН (5 грузов), 60 кН (3 груза), 80 кН (5 грузов), 120 кН (5 грузов), 150 кН (2 груза) [3].

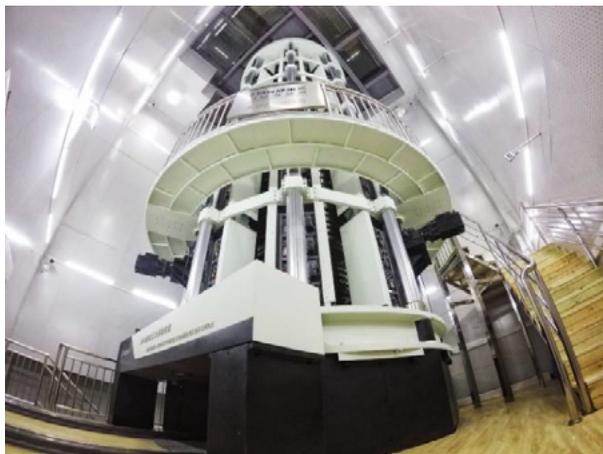


Рис. 3. Фото эталонной силовоспроизводящей установки прямого нагружения института метрологии провинции Фуцзянь (FPIМ) [3]

Fig. 3. Photo of the reference dead weight installation of the Fujian Provincial Institute of Metrology (FPIМ) [3]

Республика Корея. Корейский научно-исследовательский институт эталонов и науки (KRISS) использует эталон силы прямого нагружения до 1 МН (рис. 4) [4], укомплектованный 17 грузами, создающими усилие 10 кН (6 грузов), 50 кН (2 груза), 100 кН (9 грузов) [5].

Обзор отечественного опыта

Рассмотрим конструкцию эталонной установки прямого нагружения на примере эталона силы прямого нагружения до 1 МН Российской Федерации.

Принцип действия

Во ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» для достижения высокой точности измерений силы в ГЭТ 32–2011 реализован принцип непосредственного нагружения градуированного динамометра силой тяжести гирь. Значения расширенной неопределенности при коэффициенте охвата $k = 2$ около $1,6 \cdot 10^{-5}$ является пределом точности этого метода по многим факторам, влияющим на результат измерений. Такими факторами являются переменное значение ускорения свободного падения, флуктуации плотности воздуха, плотность материала конструкции, неопределенность массы гирь, качание и наклон



Рис. 4. Фото эталонной силовоспроизводящей установки прямого нагружения KRISS (Республика Корея) [4]

Fig. 4. Photo of the reference dead weight installation KRISS (Republic of Korea) [4]

центральной штанги эталонной установки. Также эти факторы включают влияние приливов и отливов больших масс воды в окружающих морях на значение ускорения свободного падения, влияние потока воздуха в помещении, его влажности, температуры и т. п.

В состав ГЭТ 32–2011 входит четыре эталонных установки в диапазоне измерений от 10 Н до 1 МН. Наибольшее значение силы воспроизводится на эталонной установке ЭУ-100 (рис. 5 и 6).

Конфигурация

Рама эталона состоит из двух плит сварной конструкции, соединенных между собой четырьмя колоннами, причем нижняя плита заделана в фундамент и является основанием машины. Колонны опираются на нижнюю плиту через подушки, снабженные винтовыми домкратами и кронштейнами для крепления промежуточных площадок машины. На верхней плите смонтирована рабочая часть машины. Область между плитами рамы заполнена



Рис. 5. Фото эталонной установки ЭУ-100 (фотография выполнена автором)

Fig. 5. Photo of the EU-100 reference installation (the photograph is taken by the author)

девятью секциями грузов нагружающего устройства.

Рабочая часть представляет собой реверсивное устройство, обеспечивающее установку и крепление поверяемых динамометров, работающих как на растяжение, так и на сжатие. Реверсор, в свою очередь, является совокупностью двух самостоятельных рам – неподвижной и подвижной. Неподвижная состоит из двух жесткозаделанных винтовых колонн и двух моторных траверс. Подвижная состоит из траверсы с двумя колоннами, чьи концы соединены между собой перемычкой. В эту своеобразную раму помещена поперечина, поддающаяся регулировке по высоте. Подвижная рама вместе с элементами подвижных частей нагружающего устройства, включая грузовую штангу, является первым грузом, создающим усилие 10 кН.

Нагружающее устройство представляет собой набор мер силы, обеспечивающих непосредственное приложение требуемой нагрузки при калибровке динамометра. В состав нагружающего устройства входят:

- четыре меры по 200 кН;
- одна мера на 100 кН;



Модель создана сотрудником ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» Ивановым М. С.

Рис. 6. Трехмерная модель эталонной установки ЭУ-100: 1 – рама эталона; 2 – рабочая часть; 3 – нагружающее устройство; арретир, пульт управления, термоизоляционная камера и тельфер на рисунке не указаны

Fig. 6. Three-dimensional model of the reference installation EU-100:

1 – standard frame; 2 – working part; 3 – loading device; the arrester, control panel, thermal insulation chamber and hoist are not shown in the figure

- одна мера на 50 кН;
- две меры по 20 кН;
- две меры по 10 кН.

Каждая мера имеет гирю-поддон с гильзой весом по 10 кН.

Арретир представляет собой винтовой домкрат, который расположен на верхней плите рамы машины под нижней траверсой. В корпусе установлен ходовой винт. Приводом арретира является электродвигатель, вращательное движение которого через две пары червячных передач преобразуется в линейное перемещение ходового винта.

Пульт управления эталонной установки ЭУ-100 (рис. 7) позволяет управлять электродвигателями приводов арретира, нагружающего устройства и самой рабочей части. Все процессы контролируются световой сигнализацией.

Термоизоляционная камера предназначена для поддержания необходимых температурных условий при проведении измерений.

Тельфер предназначен для подъема груза в рабочую зону эталонной установки.

Масса установки – около 400 т; высота – 10 м.



Рис. 7. Пульт управления эталонной установки ЭУ-100 (фотография выполнена автором)

Fig. 7. Control panel of the reference installation EU-100 (the photograph is taken by the author)

Анализ эталонных установок непосредственного нагружения

По результатам рассмотрения различных вариантов исполнения эталонов силы в разных странах на принципе непосредственного нагружения гирями можно сделать следующие выводы.

Преимуществами таких эталонов, безусловно, являются наивысшая точность воспроизведения единицы силы и высокая стабильность их метрологических характеристик.

Недостатками таких эталонных установок являются трудоемкость и дороговизна их изготовления, обслуживания и ремонта.

Особенности конструкции эталонов прямого нагружения: (а) возможность воспроизводить только дискретные значения нагрузок диапазона, соответствующие сумме применяемых грузов; (б) при передаче единицы может возникать проблема несовпадения вектора силы тяжести с вектором измеряемой силы.

Масштабирование эталона в большую сторону требует большой металлоемкости, стоимости, сложности ремонта, сложности разработки, изготовления переходников для приложения воспроизводимой силы к градуируемому динамометрам.

Вышесказанное показывает, что масштабирование эталонных установок неизбежно приведет к увеличению погрешности.

Заключение

Приведенный в статье обзор состава грузов и диапазонов воспроизведения единицы силы наиболее известных установок прямого нагружения, верхний предел воспроизведения которых равен или больше 1 МН, принадлежащих научно-исследовательским институтам России, Германии, США, Китая и Республики Корея выявил их преимущества, недостатки и перспективы применения. В частности, один из выводов – о целесообразности применения метода совокупных измерений в целях передачи единицы величины свыше диапазона воспроизведения эталонной силовоспроизводящей установки.

В 2019 году был опубликован финальный отчет ключевых сличений ССМ.F-K3 [6] с участием РТВ (Германия), LNE (Франция), NIST (США), INRiM (Италия), NPL (Великобритания), NMIA (Австралия), SEM (Испания), ВНИИМ (Россия), KRIS (Республика Корея), GUM (Польша), NMIJ (Япония), NIM (Китай). В результате данных сличений все метрологические институты-участники подтвердили свои измерительные возможности.

Представленные в статье эталоны силы прямого нагружения допускают воспроизведение только дискретных значений нагрузок диапазона. Для воспроизведения всех значений внутри диапазона необходимо построение калибровочной характеристики динамометра, получаемой по дискретным точкам диапазона, образуемым нагружением комбинацией грузов силовоспроизводящей машины, и последующей интерполяции в необходимой точке диапазона.

Применение методов передачи единицы величины другим эталонам или средствам измерений только в диапазоне воспроизведения эталонной установки, особенно когда требуется передача единицы в диапазоне свыше 1 МН, сопряжено со значительными технологическими трудностями в производстве и сборке таких машин, нерациональным расходом материалов при их производстве.

Возможным вариантом снижения большой ресурсоемкости увеличения диапазона воспроизведения эталона силы прямого нагружения может быть применение метода совокупных измерений [7]. Для достоверности измерений методом совокупных измерений силы требуется исследование распределения нагрузки между датчиками в группе. Эталоны на основе данного метода позволят обеспечить измерения силы свыше 1 МН. Представленный в статье материал может стать основой для исследования в этом направлении.

Благодарности: Автор благодарит рецензентов за экспертное мнение и конструктивный подход.

Acknowledgments: The author expresses their gratitude to the reviewers for advice and valuable comments during the preparation of the article.

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

Author contributions: The author confirms sole responsibility for the following: study concept and design, data collection, analysis and interpretation of results, and manuscript preparation.

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

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

Финансирование: Работа выполнялась без спонсорской поддержки. Это исследование не получало

финансовой поддержки в виде гранта от какой-либо организации государственного, коммерческого или некоммерческого сектора. Работа выполнена в рамках диссертационного исследования «Разработка методов поверки средств измерений больших значений массы на основе эталонов силы» Все измерения проводились с использованием оборудования научно-исследовательской лаборатории государственных эталонов в области измерений массы и силы ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева».

Funding: The work was performed without sponsorship. This research did not receive financial support in the form of a grant from any governmental, for-profit, or non-profit organizations. The work was carried out as part of the dissertation research «Development of methods for verifying large mass measuring instruments based on force standards». All measurements were carried out using the equipment of the research laboratory of state standards in the field of mass and force measurements of the D. I. Mendeleev Institute for Metrology.

Список источников

1. Kubarych Z. J., Yaniv S. L. The kilogram and measurements of mass and force // *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*. 2001. № 106. P. 25–46. <https://10.6028/jres.106.003>
2. Ferrero C., Marinari C., Kumme R. Investigation of parasitic components in PTB's 2 MN deadweight machine by using the INRIM six-component dynamometer // *Proceeding of the XVII IMEKO world congress, Rio de Janeiro, Brazil, 2006*. [websiete]. URL: https://www.researchgate.net/publication/242301006_Investigation_of_parasitic_components_in_PTB's_2_mn_deadweight_machine_by_using_the_INRIM_six-component_dynamometer (Accessed: 12.04.2024).
3. Analysis of mechanical properties for the key force transfer components of 2 MN deadweight force standard machine / W. Tieping [et al.] // *Acta IMEKO*. 2020. Vol. 9, № 5. P. 91–96.
4. Manufacturing and installation of a high capacity deadweight force machine / Y.-K. Park [et al.] // *XXI IMEKO World Congress «Measurement in Research and Industry»*, Prague, Czech Republic, 2015. [websiete]. URL: <https://www.imeko.org/publications/wc-2015/IMEKO-WC-2015-TC3-071.pdf> (Accessed: 12.04.2024).
5. Design of the 1 MN deadweight force standard machine in KRIS / Y.-K. Park [et al.] // *XX IMEKO World Congress «Metrology for Green Growth»*, Busan, Republic of Korea, 2012. [websiete]. URL: <https://www.imeko.org/publications/wc-2012/IMEKO-WC-2012-TC3-P28.pdf> (Accessed: 12.04.2024).
6. Final report on the force key comparison CCM.F-K3 / R. Kumme [et al.] // *Metrologia*. 2019. Vol. 56, № 1A. P. 07001–07001. <https://10.1088/0026-1394/56/1A/07001>
7. Ferrero C., Marinari C., Martino E. Development and metrological characterization of a build-up force standard up to 3 MN // *XVII IMEKO World Congress Metrology in the 3rd Millennium*, Dubrovnik, Croatia, 2003. [websiete]. URL: https://www.researchgate.net/publication/242293836_Development_and_metrological_characterization_of_a_build-up_force_standard_up_to_3_MN (Accessed: 12.04.2024).

References

1. Kubarych Z. J., Yaniv S. L. The kilogram and measurements of mass and force. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*. 2001;106:25–46. <https://10.6028/jres.106.003>
2. Ferrero C., Marinari C., Kumme R. Investigation of parasitic components in PTB's 2 MN deadweight machine by using the INRIM six-component dynamometer. *Proceeding of the XVII IMEKO world congress, Rio de Janeiro, Brazil, 2006*. Accessed April 12, 2024. https://www.researchgate.net/publication/242301006_Investigation_of_parasitic_components_in_PTB's_2_mn_deadweight_machine_by_using_the_INRIM_six-component_dynamometer (Accessed: 12.04.2024).
3. Tieping W., Jinquan G., Zhengchuang L., Shuo L., Xiaoxiang Y. Analysis of mechanical properties for the key force transfer components of 2 MN deadweight force standard machine. *Acta IMEKO*. 2020;9(5):91–96.

4. Park Y.-K., Kim M.-S., Kim K.-P., Jang J.-S., Lee J.-T., Lee H.-Y. et al. Manufacturing and installation of a high capacity deadweight force machine. XXI IMEKO World Congress «Measurement in Research and Industry», Prague, Czech Republic, 2015. Available at: <https://www.imeko.org/publications/wc-2015/IMEKO-WC-2015-TC3-071.pdf> [Accessed: April 12, 2024].
5. Park Y.-K., Song H.-K., Kim B. M.-S., Kim J.-H., Choi J.-H., Lee. J-T. et al. Design of the 1 MN deadweight force standard machine in KRIS. XX IMEKO World Congress «Metrology for Green Growth», Busan, Republic of Korea, 2012. Available at: <https://www.imeko.org/publications/wc-2012/IMEKO-WC-2012-TC3-P28.pdf> [Accessed: April 12, 2024].
6. Kümme R., Averlant P., Bartel T., Germak A., Knott A., Man J. et al. Final report on the force key comparison CCM.F-K3. Metrologia. 2019;56(1A):07001–07001. <https://10.1088/0026-1394/56/1A/07001>
7. Ferrero C., Marinari C., Martino E. Development and metrological characterization of a build-up force standard up to 3 MN. XVII IMEKO World Congress Metrology in the 3rd Millennium, Dubrovnik, Croatia, 2003. Available at: https://www.researchgate.net/publication/242293836_Development_and_metrological_characterization_of_a_build-up_force_standard_up_to_3_MN [Accessed: April 12, 2024].

Библиографический список

NIST Лаборатория физических измерений [сайт]. URL: <https://www.nist.gov/pml/productservices/million-pound-makeover> (дата обращения: 12.04.2024).

ГЭТ 32–2011 Государственный первичный эталон единицы силы / Институт-хранитель ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» // Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений : официальный сайт. 2012. URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/12/items/397917> (дата обращения: 12.04.2024).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шмигельский Илья Юрьевич – канд. техн. наук, руководитель научно-исследовательской лаборатории госэталонов в области измерений массы и силы ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева»

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

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ilya Y. Shmigelsky – Cand. Sci. (Eng.), Head of the Research Laboratory of State Standards in the Field of Mass and Force Measurements, D. I. Mendeleev Institute for Metrology

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