

Государственный первичный специальный эталон единицы длины в области измерений отклонений от прямолинейности и плоскостности ГЭТ 130-2019

Юрий Романович Шимолин¹, Лидия Александровна Трибушевская²✉, Александра Станиславовна Серегина³

^{1, 2, 3} Уральский научно-исследовательский институт метрологии – филиал ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева», Екатеринбург, Россия

¹<http://orcid.org/0000-0001-5319-4636>

²form233@uniim.ru ✉, <https://publons.com/researcher/ABI-7037-2020/>

³sereginaas@uniim.ru, <http://orcid.org/0000-0002-9067-9904>

Аннотация. Описаны состав, принцип работы и метрологические характеристики Государственного первичного специального эталона единицы длины в области измерений отклонений от прямолинейности и плоскостности ГЭТ 130-2019. Приведены результаты исследований метрологических характеристик интерференционной измерительной системы из состава ГЭТ 130-2019, с помощью которой реализовано воспроизведение единицы на основе фундаментальных физических констант и свойств материи (интерференции), что исключает дополнительные инструментальные источники погрешностей (неопределённости). С наивысшей точностью в России обеспечена передача единицы длины в области измерений отклонений от прямолинейности и плоскостности в диапазоне 0–50 мкм при длине измеряемой поверхности до 30 м. Проведённые сличения показали, что метрологические характеристики ГЭТ 130-2019 соответствуют уровню точности зарубежных эталонов для измерений отклонений от прямолинейности на длине до 30 м и представленным в базе данных Международного бюро мер и весов измерительным возможностям.

Ключевые слова: эталон, прямолинейность, плоскостность, передача единицы, сличения, интерферометр

Для цитирования: Шимолин Ю. Р., Трибушевская Л. А., Серегина А. С. Государственный первичный специальный эталон единицы длины в области измерений отклонений от прямолинейности и плоскостности ГЭТ 130-2019 // Измерительная техника. 2021. № 3. С. 3–8. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2021-3-3-8>

State primary special standard of length in the field of measurements of deviations from straightness and flatness GET 130-2019

Yuriy R. Shimolin¹, Lidiya A. Tribushevskaya²✉, Aleksandra S. Seregina³

^{1, 2, 3} Ural Research Institute for Metrology – branch office VNIIM, Ekaterinburg, Russia

¹<http://orcid.org/0000-0001-5319-4636>

²form233@uniim.ru ✉, <https://publons.com/researcher/ABI-7037-2020/>

³sereginaas@uniim.ru, <http://orcid.org/0000-0002-9067-9904>

Abstract. The information on content, theory of operation and metrological concepts of the State primary special standard of length unit in the field of measurements of deviations from straightness and flatness, GET 130-2019, conducted in 2019, is provided. The results of metrological characteristics research of the measuring interference system included in GET 130-2019 are described. With the help of an additional measuring interference system, the unit is reproduced on the basis of fundamental physical constants and the properties of matter – interference, which eliminates additional instrumental sources of errors (uncertainties). The transfer of length in the field of measurements of deviations from straightness and flatness in the range from 0 to 50 μm on the length of the measured surface up to 30 m with the highest accuracy in Russia is ensured. The conducted comparisons proved that metrological characteristics of GET 130-2019 correspond to those presented in the database of measuring capabilities of the International Bureau of Weights and Measures (BIPM) on the already confirmed by means of stationary and autonomous measuring profile length to 5 m, as well as the level of foreign standards, presented in BIPM on the length to 30 m.

Keywords: standard, straightness, flatness, transfer of units, comparisons, interferometer

Введение. Измерения отклонений от прямолинейности широко распространены на предприятиях военно-промышленного комплекса (например, измерения прямолинейности

каналов артиллерийских стволов), станкостроения (измерения прямолинейности станин и направляющих станков и оборудования), транспортного машиностроения (прямолинейность

рельсов), геолого-разведывательных и горнодобывающих предприятиях (прямолинейность буровых штанг и труб) и многих других. Кроме того, в последние годы наблюдается появление современных высокоточных средств измерений (СИ) отклонений от прямолинейности на измеряемой поверхности длиной 10 и более метров. Вновь вводимые в действие на территории Таможенного союза и Российской Федерации технические регламенты (Технический регламент Таможенного союза «О безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта» (ТР ТС 002/2011), утверждённый решением Комиссии Таможенного союза от 15 июля 2011 года № 710 и Технический регламент «О безопасности инфраструктуры железнодорожного транспорта» (ТР ТС 003/2011), утверждённый постановлением Правительства РФ от 15 июля 2010 г. № 525 и введённый в действие в 2013 г.) предусматривают требования к рельсовой продукции, одним из показателей качества которой является прямолинейность. Соответственно требуются соответствующие эталоны и методики.

В Федеральном информационном фонде обеспечения единства измерений (ФИФ) в настоящее время зарегистрировано более 170 типов СИ отклонений от прямолинейности и плоскостности отечественного и зарубежного производства (линейки поверочные, плиты поверочные, автоколлиматоры, трубы визирные и др.). Число зарегистрированных типов СИ в ФИФ постоянно увеличивается. Кроме вышеуказанных в ФИФ имеется ряд специальных СИ отклонений от прямолинейности и плоскостности (более 20 типов): измерительные системы и устройства для измерений отклонений от прямолинейности рельсов; измерительные комплексы для измерений отклонений от прямолинейности каналов труб (стволов), приборы и СИ прямолинейности и плоскостности разной конструкции, основанные на различных принципах действия [1].

СИ отклонений от прямолинейности и плоскостности широко применяются и развиваются за рубежом. Для метрологического обеспечения таких СИ в ряде стран созданы и постоянно совершенствуются эталоны. Данный вид измерений представлен в базе данных Международного бюро мер и весов (МБМВ), в таблицах калибровочных и измерительных возможностей (СМС-таблицах) зарегистрированы сведения об эталонах 10 стран мира.

Нормативная база в области измерений отклонений от прямолинейности и плоскостности представлена очень широко: 15 стандартов и технических требований к СИ и продукции, более 20 методик поверки (калибровки). Действуют международные стандарты (ISO, DIN).

Совершенствование ГЭТ 130-2014. Созданный и утверждённый в 1980 г. Государственный первичный специальный эталон единицы длины в области измерений отклонений от прямолинейности и плоскостности ГЭТ 130-80 был усовершенствован в 2014 г. [2] и в настоящее время возглавляет поверочную схему, утверждённую приказом от 28 мая 2018 г. № 1045 «Об утверждении Государственной поверочной схемы для средств измерений отклонений от прямолинейности и плоскостности». ГЭТ 130-2014 позволял воспроизводить единицу длины в области измерений отклонений от прямолинейности

и плоскостности со средним квадратическим отклонением (СКО) результата измерений S , не превышающим $0,1L$ мкм (где L – длина измеряемой поверхности в метрах) при 10 независимых наблюдениях, и неисключённой систематической погрешностью (НСП) Θ не более $0,1L$ мкм. Расширенная неопределённость $U=0,20$ мкм/м при коэффициенте охвата $k=2,0$ и доверительной вероятности $P=0,95$. Диапазон измерений отклонений от прямолинейности и плоскостности составляет 0–50 мкм.

Единица длины в области измерений отклонений от прямолинейности и плоскостности хранится и воспроизводится посредством специального твердокаменного моста. Мост представляет собой прямоугольную гранитную плиту длиной 5200 мм, шириной 400 мм и высотой 650 мм, установленную на специальном фундаменте, не связанном со стенами и полом здания, чтобы исключить влияние вибраций. Рабочая (верхняя) поверхность моста – плоскость с минимальными отклонениями от плоскости.

Совершенствование ГЭТ 130-2014 было обусловлено:

появлением современных высокоточных СИ, которые требуют соответствующего метрологического обеспечения; необходимостью повышения производительности работ по передаче единицы длины в области измерений отклонений от прямолинейности и плоскостности с применением прямых методов измерений;

высокими требованиями к поддержанию заданных значений температуры и влажности воздуха в помещении ГЭТ 130-2014 для обеспечения высоких показателей воспроизводимости и повторяемости измерений отклонений от прямолинейности и плоскостности при применении высокотехнологичных оптических прецизионных СИ;

развитием метрологического обеспечения в области измерений отклонений от прямолинейности и плоскостности с целью повышения достоверности результатов измерений при разработке перспективных видов вооружения, военной и специальной техники, технологий создания высокоскоростных транспортных средств и ракетно-космической и транспортной техники нового поколения;

расширением измерительных возможностей в области измерений отклонений от прямолинейности и плоскостности России на более высоком уровне для протяжённых поверхностей, введением в состав ГЭТ 130-2014 измерительной системы, основанной на интерферометрических методах, что позволит участвовать в сличениях аналогичных эталонов под эгидой МБМВ с ведущими зарубежными странами.

С учётом перспективы дальнейшего развития данного вида измерений одной из целей совершенствования ГЭТ 130-2014 было обеспечение передачи единицы в области измерений отклонений от прямолинейности и плоскостности в диапазоне 0–50 мкм при длине измеряемой поверхности до 30 м.

В процессе совершенствования ГЭТ 130-2014 была изменена его структура. В состав эталона включена дополнительная измерительная система, принцип действия которой основан на интерференционном методе измерений перемещений с использованием стабилизированного по частоте гелий-неонового лазера с круговой поляризацией излучения.

В результате мероприятий, выполненных в период с января 2018 г. по ноябрь 2019 г., ГЭТ 130-2014 был усовершенствован и утверждён как Государственный первичный специальный эталон единицы длины в области измерений отклонений от прямолинейности и плоскостности ГЭТ 130-2019.

Состав ГЭТ 130-2019. Принцип работы ГЭТ 130-2019 основан на синхронном независимом измерении профиля моста эталона относительно исходных прямых, воспроизведённых оптической системой, лазерной системой и гравитационным полем Земли [3]. Измерения проводили *dl*-методом [3] с шагом l тремя измерительными системами: автоколлиматором, стационарной измерительной системой и двумя электронными уровнями автономной измерительной системы. При измерении отклонений от прямолинейности поверхности *dl*-методом последовательно (шаг за шагом) определяли средний наклон профиля поверхности на отдельных участках. Отклонения от соединяющей концы профиля моста прямой, полученные в результате усреднения результатов десятикратных измерений каждой измерительной системой, были приписаны профилю моста эталона.

Единица длины в области измерений отклонений от плоскостности и прямолинейности в зависимости от конструкции СИ передаётся следующими способами:

посредством измерений отклонений от прямолинейности рабочей поверхности СИ (например, моста рабочего эталона или линейки поверочной типа ШМ) с применением одной из измерительных систем ГЭТ 130-2019 – автономной, мобильной или интерференционной;

сличением профиля моста эталона с профилем СИ (например, линейки поверочной типа ШД) с помощью компаратора, и последующего определения отклонений точек действительного профиля от опорной прямой;

непосредственным сличением с одной из измерительных систем, входящих в состав ГЭТ 130-2019.

Для измерений и передачи единицы длины в области измерений отклонений от прямолинейности и плоскостности на поверхностях длиной до 30 м применяется интерференционная измерительная система [4] на основе лазерной измерительной системы с набором оптических элементов для измерений отклонений от прямолинейности и оснастки в диапазоне 0–50 мкм при длине измеряемой поверхности до 30 м.

На рис. 1 приведена схема измерений с применением лазерной измерительной системы. Интерференционная измерительная система с использованием интерферометра прямолинейности позволяет реализовать *f*-метод измерений [3].

Измерения отклонений от прямолинейности *f*-методом заключаются в непосредственном измерении ординат функции $f(x)$, описывающей профиль поверхности относительно исходной прямой. В системе данный метод реализован посредством интерферометра прямолинейности и рефлектора прямолинейности. Пучок излучения лазера разделяется на две ортогональные линейно-поляризованные составляющие, которые после прохождения через оптические элементы, формирующие интерференцию, поступают на поляризационные анализаторы и фотоприёмники [5]. Сигналы с фотоприёмников используют для определения значения

и направления измеряемых перемещений. Измерительная информация обрабатывается с помощью персонального компьютера, оснащённого автономным специализированным программным обеспечением.

Таким образом, показания системы – отклонения от прямой, воспроизводимой интерферометром. В дальнейшем показания математически обрабатываются для вычисления отклонений от опорной прямой или прямой, соединяющей крайние точки профиля.

Результаты исследований. Проведены исследования интерференционной измерительной системы ГЭТ 130-2019 в части составляющих неопределённости измерений отклонений от опорной прямой. Для измерений использовали мост ГЭТ 130-2019, лазерный блок и рефлектор прямолинейности устанавливали на расстоянии 31,4 м друг от друга.

Схема измерений с помощью моста ГЭТ 130-2019 при длине измеряемой поверхности 0–5 м представлена на рис. 2.

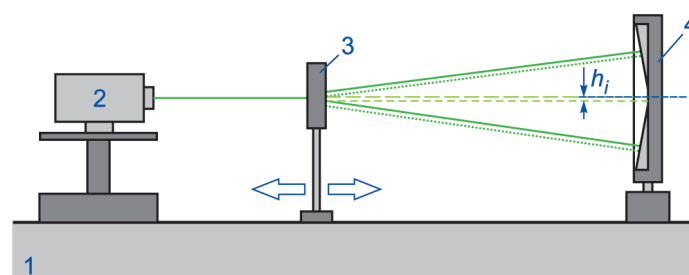


Рис. 1. Схема измерений с применением лазерной системы: 1 – измеряемая поверхность; 2 – лазерный блок; 3, 4 – интерферометр и рефлектор прямолинейности соответственно

Fig. 1. Scheme of measurements with laser system applicability: 1 – measured surface; 2 – laser unit; 3 – straightness interferometer; 4 – straightness reflector

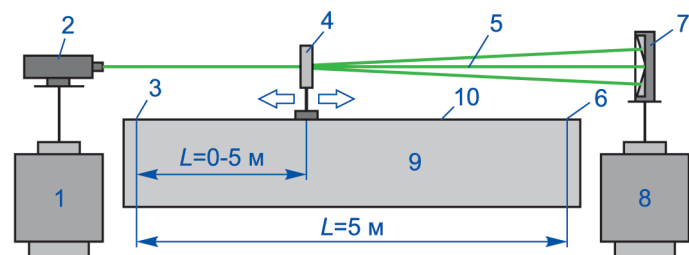


Рис. 2. Схема измерений с помощью моста ГЭТ 130-2019: 1, 8 – тумбы визирные соответственно № 1, 2; 2 – лазерный блок; 3, 6 – начало и конец зоны измерений; 4, 7 – интерферометр и рефлектор прямолинейности соответственно; 5 – опорная прямая (луч лазера); 9 – мост эталона; 10 – измеряемая поверхность

Fig. 2. Scheme of measurements on the bridge of the standard: 1 – vision board № 1; 2 – laser unit; 3, 6 – start and end of the measurement area; 4 – straightness interferometer; 5 – reference line (laser light); 7 – straightness reflector; 8 – vision board № 2; 9 – bridge; 10 – measured surface

Получены следующие результаты: стандартные неопределённости, оценённые соответственно по типам А, В – $u_A = 0,73$ мкм/м, $u_B = 0,03$ мкм/м, суммарная стандартная неопределённость $u_c = 0,73$ мкм/м, расширенная неопределённость (при коэффициенте охвата $k=2$) $U_{0,95} = 1,5$ мкм/м.

Схема измерений при исследовании интерференционной измерительной системой ГЭТ 130-2019 в диапазоне длины измеряемой поверхности, превышающей 5 м, приведена на рис. 3. Поверочная плита со стойкой были установлены таким образом, чтобы расстояние от лазерного блока до интерферометра прямолинейности составляло 1 м и расстояние между интерферометром и рефлектором было максимально близким к верхнему пределу диапазона длины измеряемой поверхности. Так как погрешность и неопределённость измерений отклонений от прямолинейности и плоскостности, исходя из принципа измерений

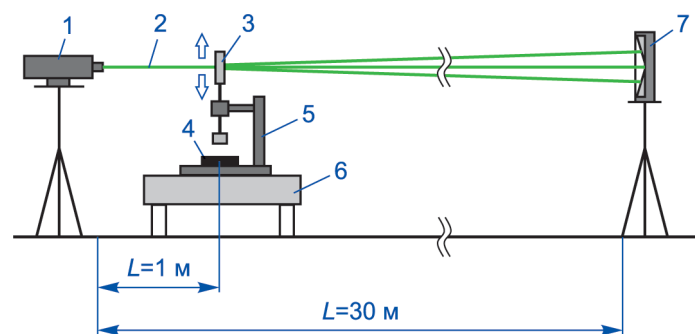


Рис. 3. Схема установки измерительных элементов при измерениях прямолинейности на длине измеряемой поверхности 30 м: 1 – лазерный блок; 2 – опорная прямая (луч лазера); 3, 7 – интерферометр и рефлектор прямолинейности соответственно; 4 – концевые меры длины; 5 – стойка; 6 – поверочная плита

Fig. 3. Scheme of installation of measuring elements with measurements of straightness at a surface length of 30 m

1 – laser unit; 2 – reference line (laser light); 3 – straightness interferometer; 4 – length gauges; 5 – base; 6 – surface plate; 7 – straightness reflector

Таблица 1

Метрологические характеристики ГЭТ 130-2019 в различных диапазонах длины измеряемой поверхности

Характеристика	ГЭТ 130-2014	ГЭТ 130-2019	
L , м	0–5	0–5	0–30
D , мкм	0–50	0–50	0–1000
СКО S , мкм	$0,07L$	$0,07L$	$0,16L$
НСП Θ , мкм	$0,10L$	$0,10L$	$0,015H$
u_A , мкм/м	$0,07L$	$0,07L$	$0,16L$
u_B , мкм/м	$0,07L$	$0,07L$	$0,015H$
u_c , мкм/м	$0,10L$	$0,10L$	$Q[0,1L; 0,009H]$
U , мкм/м ($k=2$, $P=0,95$)	$0,20L$	$0,20L$	$Q[0,2L; 0,02H]$

Примечание. L – длина измеряемой поверхности в метрах; H – отклонение от прямолинейности в микрометрах.

и уравнения измерений, имеют максимальные значения именно в точке, когда расстояние от рефлектора до интерферометра максимально.

По результатам проведённых измерений: НСП измерений длины в перпендикулярном направлении относительно лазерного луча не превышает 0,0036 мм; СКО не превышает 0,00084 мм. Сравнительные метрологические характеристики ГЭТ 130-2014 и ГЭТ 130-2019 приведены в табл. 1, где D – диапазон длины в области измерений отклонений от прямолинейности и плоскостности.

Источниками погрешности (неопределённости) являются величины, входящие в состав уравнения измерений, а также методические факторы [6, 7]:

$$y_k = \frac{(\lambda_B / n_{tpf}) M_1 - (\lambda_B / n_{tpf}) M_{2k}}{2 \sin \theta} - \Pi,$$

где y_k – отклонение от опорной прямой, k – порядковый номер точки; λ_B – длина волны лазерного излучения в вакууме; n_{tpf} – показатель преломления окружающей среды при температуре t , давлении p и влажности f ; M_1 – количество длин волн в интервале длины, соответствующем расстоянию между интерферометром прямолинейности и рефлектором прямолинейности, по линии первого опорного луча при установке интерферометра прямолинейности в точке с порядковым номером 0; M_{2k} – количество длин волн в интервале длины, соответствующем расстоянию между интерферометром прямолинейности и рефлектором прямолинейности, по линии второго луча измерений при установке интерферометра прямолинейности в точке с порядковым номером k ; θ – угол расхождения лучей в интерферометре прямолинейности (призме Волластана); Π – поправка, обусловленная угловым смещением оптической оси рефлектора прямолинейности и осью профиля эталона.

Поправка Π вносится при определении отклонений от прямой, соединяющей крайние точки профиля, и определяется как

$$\Pi = k(Y_k - Y_0) / N,$$

где Y_k , Y_0 – отклонения, соответствующие начальной и конечной точкам профиля; N – количество исследуемых точек.

Инструментальная составляющая систематической погрешности обусловлена погрешностями счётчика, определения угла расхождения лучей в интерферометре прямолинейности и частоты лазерного излучения. Все составляющие оценивают в совокупности и определяют погрешность измерений длины в перпендикулярном направлении лазерного луча по формуле

$$\delta_Y = \sum_{i=1}^m [(y_i - L_{\text{КМД}i}) / L_{\text{КМД}i}] / m,$$

где δ_Y – относительная НСП измерений длины в перпендикулярном направлении лазерного луча; y_i – показания интерференционной системы для i -й меры длины концевой (КМД) плоскопараллельной; $L_{\text{КМД}i}$ – действительное

значение меры длины концевой плоскопараллельной; m – количество контрольных точек проверки диапазона измерений длины в перпендикулярном относительно лазерного луча направлении.

Результаты международных сличений. Для подтверждения измерительных возможностей ГЭТ 130-2019 в сентябре 2019 г. проведены двусторонние сличения эталонов национальных метрологических институтов (НМИ) УНИИМ (Россия) и БелГИМ (Республика Беларусь). Сличения проходили на трассе прямолинейности БелГИМ длиной 20 м путём измерения отклонений от прямолинейности профиля трассы лазерными измерительными системами, оснащёнными интерферометрами прямолинейности из составов эталонов участников сличений. Схема сличений приведена на рис. 4.

Результаты измерений обработаны участниками сличений. Отклонения от прямолинейности, полученные с применением измерительных систем эталонов БелГИМ и УНИИМ, составили соответственно 897,05 и 875,65 мкм. В соответствии с методикой, приведённой в Техническом протоколе сличений, и с учётом положений «Руководства по выражению неопределённости измерения» [8], ГОСТ Р 54500.1-2011 «Неопределённость измерения. Часть 1. Введение в руководство по неопределённости измерения» и ГОСТ Р 54500.3-2011 «Неопределённость измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределённости измерения» определены бюджеты неопределённостей измерительных систем сличаемых эталонов при количестве измерений, равном 8 (табл. 2, $v_{\text{эфф}}$ – эффективное число степеней свободы).

Анализ попарной эквивалентности национальных эталонов при определении отклонения от прямолинейности показывает, что оценка разности результатов измерений (систематического сдвига) сличений не превосходит расширенной неопределённости этой оценки, т. е. соблюдается условие

$$|d_{ij}| \leq 2u(d_{ij}),$$

где d_{ij} – разность результатов измерений (систематический сдвиг) сличений; $u(d_{ij})$ – расширенная неопределённость разности результатов измерений (табл. 3). Полученные результаты свидетельствуют об эквивалентности эталонов и соответствии метрологических характеристик ГЭТ 130-2019 значениям, заявленным в техническом задании на совершенствование ГЭТ 130-2014.

Задача обеспечения прослеживаемости измерений отклонений от прямолинейности и плоскостности стоит перед многими НМИ разных стран мира. На сайте МБМВ

представлена краткая информация об измерительных возможностях разных стран в данной области измерений (KCDB [сайт]. URL: <https://www.bipm.org/kcdb/cmc>).

В табл. 3 приведён сравнительный анализ эталонов единицы длины в области измерений отклонений от прямолинейности

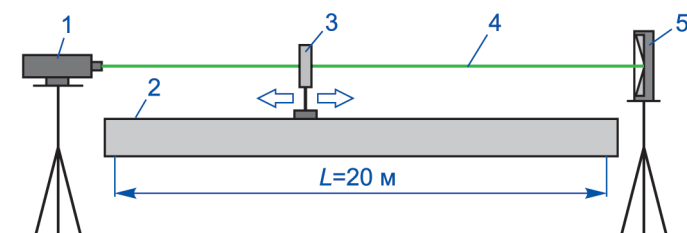


Рис. 4. Схема сличений интерференционных измерительных систем: 1 – лазерный блок; 2 – измеряемая поверхность; 3, 5 – интерферометр и рефлектор прямолинейности соответственно; 4 – луч лазера

Fig. 4. Scheme of comparisons of interference systems of measurements 1 – laser unit; 2 – measured surface; 3 – straightness reflector; 4 – laser light; 5 – straightness interferometer

Таблица 2

Бюджет неопределённостей измерительных систем сличаемых эталонов

Характеристика	БелГИМ	УНИИМ
u_A , мкм	$0,16L$	$0,1L$
u_B , мкм	$0,009H$	$0,009H$
u_C , мкм	$Q[0,16L; 0,009H]$	$Q[0,1L; 0,009H]$
$v_{\text{эфф}}$	13	17
U , мкм ($k=2, P=0,95$)	$Q[0,32L; 0,02H]$	$Q[0,2L; 0,02H]$

Таблица 3

Измерительные возможности в области измерений отклонений от прямолинейности по данным МБМВ

НМИ	Диапазон измерений, мкм	Длина, м	U^{**} , мкм, ($k=2$)	Принцип действия
УНИИМ (Россия)	0–50	0–4	$0,2L$	Образец прямолинейности
	0–1000*	<30	$Q[0,2L; 0,02H]$	Лазерный интерферометр
КазИнМетр (Казахстан)	0–50	<4	$0,2L$	Автоколлиматор
БелГИМ (Беларусь)	0–50	0,2–3,0	$0,2L$	Образец прямолинейности
VLS (Нидерланды)	0–100	0,1–2,5	$Q[0,4; 0,6L]$	Электронные уровни
RISE (Швеция)	0–100	0–2	$Q[0,7; 0,03S]$, где S в мкм	Измеритель прямолинейности
СМИ (Чешская Республика)	0–1500	<15	$Q[0,7; 1L; 11S]$, где S в мм	Лазерный интерферометр
MIKES (Финляндия)	0–200	<20	$Q[0,3; 0,5L]$	Лазерный интерферометр, угловая оптика

Примечание. *Характеристики, требующие подтверждения измерительных возможностей для актуализации сведений о метрологических характеристиках эталона в базе данных МБМВ; ** L в метрах, H в микрометрах.

и плоскостности ведущих стран мира. Россия занимает в этом виде измерений одно из ведущих мест.

Полученные результаты двусторонних сличений показали, что метрологические характеристики ГЭТ 130-2019 соответствуют заявленным. Характеристики неопределённости ГЭТ 130-2019 находятся на мировом уровне.

Заключение. ГЭТ 130-2019 обеспечивает хранение, воспроизведение и передачу единицы длины в области измерений отклонений от прямолинейности и плоскостности с наивысшей точностью в России и позволяет на уровне мировых аналогов решать актуальные проблемы метрологического обеспечения в различных областях промышленности, в том числе при обеспечении задач импортозамещения и реализации требований технических регламентов таможенного союза.

Список литературы

1. Шимолин Ю. Р., Злыдникова Л. А. Измерения отклонений от прямолинейности и плоскостности // В кн. Российская метрологическая энциклопедия / Под ред. В. В. Окрепилова. 2-е изд. Т. 1. СПб.: ИИФ «Лики России», 2015. С. 235–239.
2. Шимолин Ю. Р., Злыдникова Л. А. Государственный первичный специальный эталон единицы длины в области измерений отклонений от прямолинейности и плоскостности ГЭТ 130-2014 // Измерительная техника. 2016. № 2. С. 3–6.
3. Леонов В. В. Анализ методов измерений отклонений от прямолинейности и плоскостности поверхностей. М.: Изд-во стандартов, 1982. 247 с.
4. Базыкин С. Н. Информационно-измерительные системы для измерения отклонений от прямолинейности перемещений // Современные наукоемкие технологии. 2016. № 7-1. С. 21–25.
5. Базыкин С. Н., Базыкина Н. А., Капезин С. В. Измерение отклонений от прямолинейности с помощью лазерных интерферометров // Надежность и качество. Труды международного симпозиума: в 2-х т. Пенза: Из-во ПГУ. 2011. С. 8–12.
6. Захаренко Ю. Г., Кононова Н. А., Лейбенгардт Г. И., Чекирда К. В. Тридцатиметровый лазерный интерференционный

компаратор, входящий в состав государственного первичного эталона единицы длины // Измерительная техника. 2012. № 5. С. 22–56.

7. Александров В. С., Захаренко Ю. Г., Кононова Н. А., Лейбенгардт Г. И., Федорин В. Л., Чекирда К. В. Государственный первичный эталон единицы длины – метра ГЭТ 2–2010 // Измерительная техника. 2012. № 6. С. 3–7.

8. Руководство по выражению неопределенности измерения / Пер. с англ. под науч. ред. Слаева В. А.; СПб.: ВНИИМ, 1999. 134 с.

References

1. Shimolin Ju. R., Zlydnikova L. A., *Russian Metrological Encyclopedia*, ed. by V. V. Okrepilov, vol. 1, St. Petersburg, IIF “Liki Rossii” Publ., 2015, pp. 235–239 (in Russ.).
2. Shimolin Yu. R., Zlydnikova L. A., *Measurement Techniques*, 2016, vol. 59, no. 2, pp. 105–110. <https://doi.org/10.1007/s11018-016-0925-1>
3. Leonov V. V., *Analiz metodov izmerenij otklonenij ot prjamolinejnosti i ploskostnosti poverhnostej*, Moscow, Izd-vo standartov Publ., 1982, 247 p. (in Russ.).
4. Bazykin S. N., Information-measuring systems for the measurement of deviations from straightness of movement, *Modern High Technologies*, 2016, no. 7 (part 1), pp. 21–25 (in Russ.).
5. Bazykin S. N., Bazykina N. A., Kapezin S. V., *Izmerenie otklonenij ot prjamolinejnosti s pomoshh'ju lazernyh interferometrov*, *International Simposium “Reliability and Quality”*, PGU Publ., Penza, 2011, pp. 8–12 (in Russ.).
6. Zaharenko Yu. G., Kononova N. A., Lejbengardt G. I., Chekirda K. V., *Measurement Techniques*, 2012, vol. 55, no. 5, pp. 519–525. <https://doi.org/10.1007/s11018-012-9992-0>
7. Aleksandrov V. S., Zaharenko Yu. G., Kononova N. A., Lejbengardt G. I., Fedorin V. L., Chekirda K. V., *Measurement Techniques*, 2012, vol. 55, no. 6, pp. 595–602. <https://doi.org/10.1007/s11018-012-0007-y>
8. *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, St. Petersburg, VNIIM Publ., 2015 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 27.07.2020; принята к публикации 08.10.2020.