

Возможности использования 30-метрового лазерного интерференционного компаратора для метрологического обеспечения нефтегазовой отрасли

Ю. Г. ЗАХАРЕНКО, Н. А. КОНОНОВА, К. В. ЧЕКИРДА

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, С.-Петербург, Россия, e-mail: N.A.Kononova@vniim.ru

Представлены метрологические характеристики современных высокоточных лазерных измерительных систем, средств измерений уровня нефти и нефтепродуктов, применяемых при коммерческом учете. Приведены результаты исследований составляющих неисключенной систематической и случайной погрешностей, среднего квадратического отклонения и доверительных границ суммарной погрешности передачи единицы длины 30-метровым лазерным интерференционным компаратором из состава государственного первичного эталона единицы длины — метра.

Ключевые слова: лазерный интерференционный компаратор, эталон единицы длины, уровнемер.

The metrological characteristics of modern high-accuracy laser measurement systems, and oil and oil products level measuring instruments applied for commercial accounting measurements are presented. The results of theoretical and experimental studies of components of non-exceptional systematic and random errors, mean square deviation and limits of net inaccuracy of transmission of length unit by 30-m laser interference comparator from composition of the state primary standard of length unit — the meter — are presented.

Key words: laser interference comparator, state primary standard of length unit — meter, level meter.

Актуальность создания и введения в состав государственного первичного эталона единицы длины — метра ГЭТ 2—2010 [1] нового 30-метрового лазерного интерференционного компаратора обусловлена тем, что наряду с традиционно применяемыми эталонными лентами 2-го и 3-го разрядов, все большее распространение получают лазерные высокоточные интерферометры, координатно-измерительные системы, сканеры и др. Кроме того, появляются новые, а также совершенствуются уже существующие средства измерений (СИ) уровня нефти и нефтепродуктов из состава измерительно-управляющих систем для коммерческого учета и управления резервуарными парками.

Перечисленные выше СИ можно использовать как для решения актуальных научных задач, так и в важнейших отраслях промышленности — нефтегазовой, оборонной, в машиностроении.

Во ВНИИМ большой опыт разработки, исследований, калибровки, испытаний с целью утверждения типа и поверки высокоточных современных лазерных СИ, а также СИ уровня, основанных на различных физических принципах. В табл. 1 приведены метрологические характеристики ряда современных высокоточных лазерных измерительных систем. Из опыта калибровки и испытаний данных СИ известно, что лучшие из них имеют пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений $\pm 0,5$ мкм/м в диапазоне до 40 м.

Средства измерений уровня нефти или нефтепродуктов, применяемые для измерений уровня при коммерческом учете, имеют пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений ± 1 мм в диапазоне до 30 м. К сожалению, существующие установки и компараторы конструктивно не приспособлены для передачи единицы длины новым лазерным СИ и СИ уровня. Для этой цели был создан новый компаратор [2, 3], способный передавать единицу длины не только эталонным лентам, но и современным высокоточным СИ. Его основой является измерительный блок и оптические элементы лазерной измерительной системы XL-80.

Оптико-механическая система компаратора содержит: стальные прецизионные направляющие длиной 32 м, интегрированные в алюминиевый профиль. Направляющие установлены на юстируемых опорах, обеспечивающих возможность боковых и вертикальных регулировок. Опоры располагаются на основании, которое кронштейнами крепится к стене помещения;

кадетку с электроприводом. Для питания и управления шаговым двигателем служат специальные блоки. Скорость движения каретки задается компьютером;

устройства для исследований лазерных интерферометров и координатно-измерительных систем, радарных уровнемеров и т. п.;

систему обнаружения штрихов эталонных лент; приспособления для закрепления концов эталонных лент на компараторе, наборы гирь, тросов, используемых для

Таблица 1

Метрологические характеристики современных высокоточных лазерных измерительных систем

Средство измерений	Фирма-изготовитель, страна	Диапазон измерений расстояний, м	Пределы допускаемой погрешности измерений расстояний, мкм
ЛКИС API RADIANT	Automated Precision Inc., США	0—20 0—50 0—80	$\pm 5L^*$
API Tracker3 API OMNITRAC		0—15 0—40 0—60	$\pm 5L$ или $\pm 25L$ при $L < 10$ м $\pm 2,5L$ при $L > 10$ м
Лазерная измерительная система XD		0—40	$\pm 0,5L$ или $\pm 0,2L$
Координатно-измерительная машина FARO Laser Tracker	FARO Technologies Inc., США	0—55	(10,0+2,5) мкм/м
Лазерные измерительные машины ML10 ML10X HS10 RLE	Renishaw plc, Великобритания	0—4 0—30 0—40 0—80	$\pm 0,7L$ или $\pm 1L$
Лазерная измерительная система XL-80		0—80	$\pm 0,5L$

* — L — измеряемое расстояние, м.

крепления грузов к концам лент; специальный блок, установленный в конце направляющих и служащий для уменьшения силы трения.

При исследованиях современных высокоточных СИ используются устройства для крепления отражателей систем или интерферометров на каретке компаратора. Задав перемещение каретки, а следовательно, и отражателя лазерной координатно-измерительной системы (ЛКИС) и получив показания от исследуемой системы, можно определить ее погрешность. Аналогичным образом находят погрешность, например, уровнемеров, только в качестве отражателя используют специальный экран, который также крепится к каретке компаратора.

Система обнаружения штрихов эталонных лент состоит из видеомикроскопа, установленного на каретке компаратора. Подсветка осуществляется светодиодным осветителем на гибком держателе. Изображение штрихов фиксируется монохромной CCD-камерой с разрешением 640×480 пикселей, встроенной в видеомикроскоп, и передается по радиоканалу приемнику радиосигнала. После этого оно поступает на модуль видеозахвата и далее в систему обработки изображений, которая автоматически определяет центр штриха.

Также в состав компаратора входит система измерений параметров окружающей среды и температуры исследуемого СИ. Длина волны лазерного излучения рассматриваемой системы компаратора зависит от показателя преломления окружающей среды, в которой оно распространяется. В компараторе предусмотрено измерение показателя преломления с помощью лазерного рефрактометра при исследовании высокоточных лазерных измерительных систем.

В случае измерений эталонных лент показатель преломления определяется по эмпирической формуле Эдлена, в которой используются параметры окружающей среды, измеряемые четырьмя СИ температуры с платиновыми терморезисторами, равномерно распределенными вдоль компаратора; барометром типа БРС-1М-2; измерителем влажности и температуры ИВТМ-7 М.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований составляющих неисключенной систематической погрешности компаратора приведены в табл. 2. Рассмотрены два случая: измерение эталонной измерительной ленты 2-го разряда и ЛКИС API Tracker3 (см. табл. 1).

По результатам экспериментальных данных были также определены суммарное среднее квадратическое отклонение (СКО) и доверительные границы суммарной погрешности передачи единицы длины. Было показано, что в случае передачи единицы длины современной ЛКИС API Tracker3 суммарное СКО не превышает 0,9 мкм, а доверительные границы суммарной погрешности передачи единицы длины при доверительной вероятности 0,99 не более $\pm 2,9$ мкм.

Таким образом, компаратор введен в установленном порядке в состав ГЭТ 2—2010. Конструктивные особенности компаратора позволили расширить функциональные возможности эталона. Теоретические и экспериментальные исследования источников погрешности компаратора послужили основой для разработки методов и определения путей дальнейшего совершенствования конструкции компаратора с целью повышения точности передачи единицы длины. Компаратор применяли для экспериментальных ис-

Составляющие неисключенной систематической погрешности компаратора

Составляющие погрешности	Значение погрешности при исследованиях	
	ЛКИС	эталонной измерительной ленты*
Погрешность определения длины волны в вакууме	$5 \cdot 10^{-9}L^{**}$	$5 \cdot 10^{-9}L$
Погрешность определения поправки для приведения полученной длины интервала эталонной ленты к температуре 20 °С	—	$5,75 \cdot 10^{-7}L$
Погрешность определения поправки, связанной с ошибкой Аббе, мкм	0,0002	0,011
Погрешность определения поправки, связанной с ошибкой из-за отклонения от параллельности между осью лазерного луча компаратора и осью измеряемого объекта	$1,7 \cdot 10^{-10}L$	$1,7 \cdot 10^{-10}L$
Погрешность определения поправки, связанной с натяжением эталонных лент и влиянием силы трения, Θ_{Ft}	—	$1,39 \cdot 10^{-8}L$
Погрешность определения поправки при использовании формулы Эдлена для расчета показателя преломления окружающей среды	—	$7,4 \cdot 10^{-8}L$
Погрешность определения показателя преломления при использовании лазерного рефрактометра	$9 \cdot 10^{-9}L$	—
Погрешность определения центра штриха, мкм	—	0,05

* — значения приведены для стальной эталонной ленты, температурный коэффициент линейного расширения которой равен $11,5 \cdot 10^{-6}$ К, площадь поперечного сечения 3,5 мм², модуль Юнга для стали $2,06 \cdot 10^5$ Н/мм²; ** — L — измеряемая длина, м.

следований новейших высокоточных СИ. Результаты исследований использованы при разработке серийного варианта компараторов для оснащения центров стандартизации и метрологии РФ, а также ведущих предприятий важнейших отраслей промышленности, в том числе нефтегазовой. Утвержден новый национальный стандарт РФ [4].

Компаратор работает в составе ГЭТ 2—2010 на протяжении трех лет и обеспечивает исследования, испытания, поверку и калибровку высокоточных СИ.

Л и т е р а т у р а

1. **Александров В. С. и др.** Государственный первичный эталон единицы длины — метра ГЭТ 2—2010 // Измерительная техника. 2012. № 6. С. 3—7; **Alexandrov V. S. e. a.** State primary standard for the unit of length, the meter, GET 2—2010 // Measurement Techniques. 2012. V. 55. N. 6. P. 595—602.

2. **Кононова Н. А.** Тридцатиметровый лазерный интерференционный компаратор из состава государственного первичного эталона единицы длины — метра // Метрология и метрологическое обеспечение 2011: Сб. докл. XXI Нац. науч. симп. с междунар. участием. Созополь (Болгария), 2011. С. 88—92.

3. **Захаренко Ю. Г. и др.** Тридцатиметровый лазерный интерференционный компаратор, входящий в состав государственного первичного эталона единицы длины — метра // Измерительная техника. 2012. № 5. С. 22—26; **Zakharenko Yu. G. e. a.** The thirty-meter laser interference comparator which forms part of the state primary standard of the unit of length — the meter // Measurement Techniques. 2012. V. 55. N. 5. P. 519—525.

4. **ГОСТ Р 8.763—2011.** ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений длины в диапазоне от $1 \cdot 10^{-9}$ до 50 м и длин волн в диапазоне от 0,2 до 50 мкм.

Дата принятия 27.01.2014 г.