

мерений и дополнительной оценки погрешности, связанной с временными флуктуациями отсчета, программа обработки интерференционной картины обеспечивает предварительное цифровое накопление (суммирование) вводимых изображений и многократное измерение с усреднением отдельных отсчетов. Необходимый для вычисления угла показатель преломления воздуха находят по стандартной формуле Эдлена, параметры температуры, давления и влажности воздуха вводит оператор. Помимо нахождения угла программа обеспечивает управление контроллером шагового двигателя, осуществляющего поворот зеркала 10. Имеется возможность повернуть зеркало на любой заданный оператором угол с плавным разгоном и торможением.

Для калибровки цифровых автоколлиматоров программа позволяет вводить отсчет поверяемого прибора для использования его в протоколе совместно с результатом измерения угла экзаменатором. В настоящее время отсутствует стандартный интерфейс для связи с программами цифровых приборов, поэтому возможность полностью автоматической поверки — поворотов и измерений без участия оператора реализована только для автоколлиматоров ВНИИМ (в виде встроенного программного модуля).

Заключение. Разработан и исследован экзаменатор на основе многолучевого интерферометра Физо, обеспечивающий воспроизведение плоского угла в диапазоне до $\pm 600''$. Преимуществом созданного интерференционного экзаменатора является широкий диапазон измерений. Исследования показали, что случайная погрешность не превышает $0,01''$. Неисключенная систематическая погрешность определяет

ся в основном погрешностью измерения периода интерференционных полос и составляет не более $0,01''$. Калибровка системы измерений периода интерференционных полос производится с помощью штриховой меры длины откалиброванной на ГПЭ единицы длины — метра. Экзаменатор можно применять для поверки и калибровки высокоточных электронно-цифровых автоколлиматоров, имеющих диапазон измерений $\pm 600''$ и более.

Л и т е р а т у р а

1. Шестопалов Ю. Н., Мартынов В. Т., Брда В. А. Новый государственный первичный эталон единицы плоского угла // Исследования в области угловых измерений: Сб. науч. тр. Л.: Энергоатомиздат, 1983. С. 42—49.
2. Чекирда К. В., Косьмина М. А., Лейбенгардт Г. И., Шур В. Л., Лукин А. Я. Совершенствование Государственного первичного эталона плоского угла // Измерения и испытания в судостроении и смежных отраслях. Судометрика-2014: 5-я Всерос. науч.-техн. конф. Тез. докл. СПб, 2014. С. 157—159.
3. Понаровский А. А., Томашевский Ю. Ф. Пространственная структура многолучевой интерференции Физо // Оптика и спектроскопия. 1978. Т. 15. Вып. 4. С. 773—778.
4. Компан Т. А., Корнев А. С., Лукин А. Я. Автоматизированная система дилатометрических измерений с многопараметрической обработкой информационной картины // Измерительная техника. 2001. № 6. С. 31—35.

Дата принятия 02.06.2015 г.

53.089.68

Измерения геометрических параметров резьбовых калибров

Ю. Г. ЗАХАРЕНКО, Н. А. КОНОНОВА, А. А. МОСКАЛЁВ

Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, С.-Петербург, Россия, e-mail: Y.G. Zakharenko@vniim.ru

Приведены характеристики государственного эталона 1-го разряда единицы длины — метра в диапазоне 10^{-6} —1100 мм, введенного в эксплуатацию во ВНИИМ им. Д. И. Менделеева. Представлены результаты исследований эталона в области метрологического обеспечения резьбовых калибров.

Ключевые слова: единица длины, эталон, резьба, резьбовые калибры, средний диаметр резьбы.

The general characteristics of the State first echelon standard of unit of length — meter in the range 10^{-6} —1100 mm placed in service in VNIIM are represented. The standard research results in the field of metrology assurance of thread gauges are given.

Key words: unit of length, standard unit, thread, thread pitch gauges, average thread pitch diameter.

Резьбовые соединения широко используют во многих отраслях промышленности. Требования по надежности и износостойкости таких соединений различаются в зависимости от области применения. Например, в условиях вакуума или при сложной разнонаправленной нагрузке в узлах, работающих под давлением, они значительно возрастают. Интенсивный рост и развитие промышленности (главным

образом отраслей нефте-, газодобывающего комплексов и аэрокосмической отрасли) сопровождаются повышением требований к надежности существующих и вновь выпускаемых деталей. Так как эксплуатационные характеристики резьбовых соединений в первую очередь определяются точностью изготовления геометрических элементов резьбы, необходим повышенный контроль таких элементов. Для этого

на используемых деталях применяют резьбовые калибры, по характеру свинчивания которых с рабочей резьбой определяют пригодность последней. Резьбовые калибры контролируют с помощью различных средств измерений (СИ) более высокой точности — координатно-измерительных машин (КИМ) либо горизонтальных длиномеров. В метрологической практике резьбовой калибр не принято считать СИ, что влечет отсутствие поверочных схем и определённого регламента передачи единицы длины от резьбовых калибров резьбовым соединениям, однозначности подхода к полноте и способу выражения метрологических характеристик и пригодности к применению тех или иных калибров. Требования к резьбовым калибрам одного типа могут значительно отличаться в различных национальных стандартах. Строгого соответствия между российскими и международными нормативными документами в этой области нет, а работы по гармонизации стандартов не получили широкого распространения. В российской промышленности доля импорта резьбовых соединений еще недавно была значительной, выпускались они по зарубежным нормативным документам. Например, практически вся нефтедобывающая отрасль работает по американским стандартам на коническую резьбу API, при том, что в России существует полноценный аналог. Складывается ситуация, когда отечественная промышленность зависит от иностранных метрологических ресурсов. Кроме того, существуют предприятия, выпускающие специфические резьбовые соединения, которые имеют узкую область применения и обладают характеристиками, не подлежащими объективному контролю с помощью резьбовых калибров, изготовленных по существующим стандартам. Такие предприятия вынуждены самостоятельно разрабатывать резьбовые калибры по собственным чертежам, при этом формальный статус калибров остается неопределённым.

Необходимо выработать единый подход к метрологическому обеспечению резьбовых соединений, так как потребность отечественной промышленности в сертифицированных резьбовых калибрах постоянно возрастает. Не лучшим образом выглядит ситуация и за рубежом. Измерительные возможности в области резьбовых соединений, помимо ВНИИМ, заявляют всего десять национальных метрологических институтов (согласно базе данных BIPM). Отсутствуют и крупные международные сличения по данному направлению. Единственная существующая в настоящее время тема по сличениям резьбовых калибров действует с 2012 г. в рамках EURAMET и охватывает национальные метрологические лаборатории десяти стран-участниц (Швейцария, Финляндия, Турция, восточно-европейские страны), но сами калибры представлены узкой номенклатурой типов и размеров.

С 2001 г. отдел геометрических измерений ВНИИМ ведет работы по созданию метрологического обеспечения резьбовых калибров для формирования общего подхода к порядку их применения и передаче единицы длины рабочим резьбам. Создана поверочная схема для калибров замковой резьбы и ряд методик.

В 2014 г. во ВНИИМ утвержден государственный эталон 1-го разряда единицы длины — метра в диапазоне 10^{-6} —1100 мм. В основе эталона — горизонтальный длиномер LabConcept NANO швейцарской фирмы «Trimos». Область его применения — высокоточные измерения эталонных плоскопараллельных концевых мер длины и эталонных мер внутреннего и наружного диаметров. Однако при использовании необходимых аксессуаров длиномер можно при-

менять и для резьбовых калибров. Диапазон абсолютных измерений прибора определяется перемещением измерительной каретки и составляет 0—350 мм, а относительных — максимальной длиной установочной меры, он находится в пределах 0—1100 мм. Допускаемая абсолютная погрешность измерений согласно разряду по государственной поверочной схеме для СИ длины составляет $\pm(0,05+0,5L)$ мкм, где L — измеряемая величина в метрах. Эта характеристика улучшена на 30 % по сравнению с данными, заявленными изготовителем, и подтверждена результатами исследований с использованием государственного вторичного эталона единицы длины — метра, а также эталонных плоскопараллельных концевых мер длины и измерительных колец. Сократить абсолютную погрешность можно с помощью технических решений, реализованных в длиномере, и дополнительных условий, предусмотренных для содержания и эксплуатации эталонных установок.

Эталон был установлен в специально подготовленном помещении, в котором круглосуточно поддерживали температуру $(20,0\pm 0,1)$ °C, равномерно распределенную по объёму (при заявленном в технической документации диапазоне 15—25 °C). Эталон снабжен системой температурной компенсации, учитывающей в режиме реального времени температуры длиномера и измеряемого объекта, и вносящей соответствующие поправки в результаты измерений. В системе отслеживаются изменения температуры с течением времени, на основании полученных данных выдаются рекомендации по оценке достоверности результатов измерений в конкретных температурных условиях. Длинномер размещён на специальном виброзащитном столе со встроенной пневматической системой с обратной связью, позволяющей автоматически регулировать горизонтальное положение прибора и компенсирующей изменение центра тяжести при перемещении подвижных кареток и измерительного стола. Такое расположение длиномера особенно важно при работе с резьбовыми калибрами, масса которых при значительных номинальных диаметрах достигает десятков килограммов.

Длинномер имеет конструктивные особенности, принципиально отличающие его от аналогов. Измерительная каретка перемещается только в автоматическом режиме, это позволяет полностью исключить погрешности, связанные со сбоем счета, так как скорость перемещения подвижных узлов ограничена и не может превышать значений, предусмотренных технической документацией. Измерительный стол снабжен электроприводом, управляющим вертикальным и горизонтальным перемещениями. Такое решение позволяет точно позиционировать измеряемый объект, в частности, резьбовой калибр, относительно измерительных наконечников и оси. Так как измерительная каретка и стол длиномера оснащены управляемыми приводами, вклад в результат измерений погрешностей, связанных с человеческим фактором, можно минимизировать. Прибор имеет систему автоматического задания и приложения измерительных усилий с дискретностью 0,01 Н, что позволяет исключить погрешность, связанную с различным характером приложения этих усилий при многократных измерениях.

Совокупность описанных решений позволила получить указанные точностные характеристики. В процессе измерений эталонных плоскопараллельных концевых мер длины на эталоне удалось достичь ещё более низкой погрешности в пределах $\pm 0,02$ мкм. Несмотря на то, что результаты не

имеют высокой повторяемости, общее количество не позволяет приравнивать их к статистическим выбросам и, следовательно, можно говорить о потенциальной возможности повышения точности эталона в перспективе.

Измерения резьбовых калибров достаточно специфичны. Резьбовой калибр является мерой, в которой содержится информация о таких геометрических параметрах, как шаг и диаметр резьбы (наружный, внутренний, средний), угол ее профиля. Наиболее важен средний диаметр, для некоторых типов калибров его размер задают с погрешностью не более ± 3 мкм [1]. Именно по среднему диаметру происходит сопряжение наружной и внутренней резьбы. Однако этот размер соответствует цилиндру, проходящему частично в теле калибра, что усложняет процесс измерений. Фактически любой метод нахождения данного параметра является косвенным. Таким образом, наиболее ответственный параметр калибра в то же время и самый сложный для измерений. Поэтому при подборе резьбовых калибров, в первую очередь, определяют средний диаметр. Для этого существует два основных метода: проекционный и метод трех проволок, используемый на эталоне ВНИИМ. Теория метода такова: во впадины резьбы, соответствующие одному витку, с противоположных сторон закладывают гладкие цилиндрические проволоочки (рисунок а). Их диаметр d_n рассчитывают из условия касания образующих проволок с профилем резьбы в точках, принадлежащих номинальному среднему диаметру. Диаметр проволок нормируется с погрешностью не более $\pm 0,3$ мкм. Далее определяют размер M , из которого рассчитывают средний диаметр d_2 [2, 3]. В случае нахожде-

ния среднего диаметра внутренней резьбы цилиндрические проволоочки заменяют сферическими наконечниками Т-образного щупа длиномера. При этом теоретическое обоснование метода остается аналогичным (рисунок б).

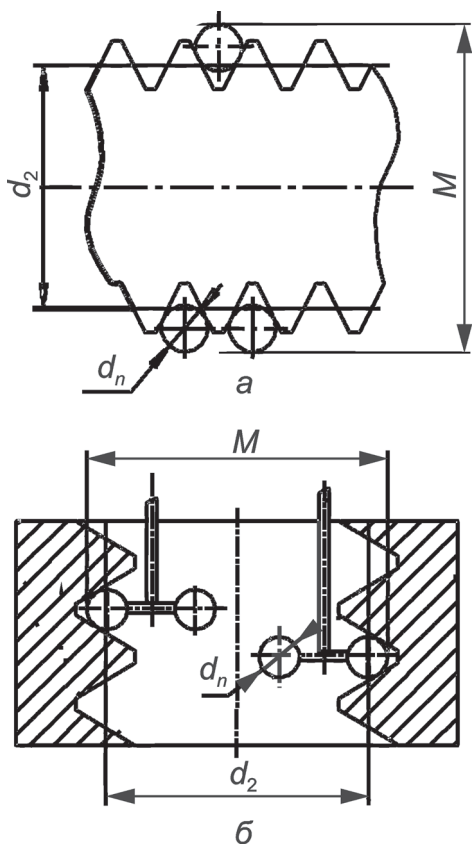
Приведем составляющие неопределённости, возникающие при определении диаметра d_2 резьбового калибра с использованием горизонтального длиномера: температура калибра и длиномера; температурный коэффициент линейного расширения калибра; позиционирование калибра относительно оси измерения; диаметр используемых проволок; отсчёт и дрейф нуля; измерительное усилие.

В используемом для измерений среднего диаметра резьбовых калибров эталоне каждая из перечисленных составляющих снижена.

Применение системы температурной компенсации в совокупности с мерами по термостатированию помещения, в котором расположен эталон, позволяют получить актуальные данные о температурном поле в процессе измерений с погрешностью не более $\pm 0,01$ °С. Приводы стола, управляющие вертикальным и горизонтальным перемещениями, позволяют точно позиционировать резьбовой калибр на оси, что важно при измерении колец, причём не только резьбовых, но и гладких эталонных. Погрешность, связанная с неточным позиционированием калибра, возникает при отклонении оси измерения от плоскости, соответствующей диаметральному сечению калибра. При существовании подобной погрешности получается результат, в действительности не соответствующий измеряемому параметру. На длиномере, разработанном во ВНИИМ, положение диаметрального сечения калибров полностью определяется в автоматическом режиме с помощью соответствующих программ, что позволяет минимизировать возникающую составляющую погрешности. Кроме того, возможность задания вертикального перемещения измерительного стола также важна при необходимости проведения измерений диаметра d_2 в нескольких сечениях на расстоянии, кратном шагу резьбы.

Неопределённость, связанная с диаметром используемых проволок, возникает из-за того, что в математической модели их диаметры принимают равными и выбирают из стандартного ряда. Для уточнения результатов измерений необходимо введение поправки, учитывающей действительные диаметры каждой из проволок. Согласно существующим стандартам диаметр проволок нормируется с погрешностью в пределах $\pm 0,3$ мкм, а с помощью эталона ВНИИМ его можно определить с погрешностью не более $\pm 0,1$ мкм. Таким образом, уточняется поправка, вводимая в результат измерений среднего диаметра резьбы. Аналогичные показатели точности соответствуют диаметрам сферических наконечников Т-образного щупа длиномера, используемого при работе с резьбовыми калибрами-кольцами.

Неопределённости отсчёта показаний и установки длиномера на ноль связаны с инструментальными погрешностями, непараллельностью измерительной шкалы и направляющих подвижной каретки, неоднозначностью отсчёта при изменении направления перемещения каретки. В качестве отсчётного устройства используют дифракционную линейку фирмы «HEIDENHAIN» (Германия) с дискретностью 1 нм. По результатам исследований эталона суммарная составляющая неопределённости измерений, связанная с перечисленными факторами, не превышает $\pm 0,05$ мкм.



Метод трех проволок: а — наружная резьба (калибр-пробка); б — внутренняя резьба (калибр-кольцо)

Установленная в длиномере система автоматического задания и приложения измерительного усилия позволяет снизить соответствующую составляющую неопределённости. Ввод измерительных накопечников длиномера в контакт с поверхностью измеряемого объекта происходит полностью без участия оператора. Следовательно, исключается погрешность, возникновение которой связано с разным характером приложения измерительных усилий при многократных определениях среднего диаметра. Кроме того, при нахождении среднего диаметра калибров-колец обеспечивается симметричность приложения усилий при контакте щупа с противоположными сторонами профиля резьбы.

Приведённые выше технические решения и особенности эксплуатации эталона позволили снизить неопределённость измерений среднего диаметра. Расширенная неопределённость измерений, подтверждённая продолжительными исследованиями резьбовых калибров, не превышает 0,7—1,0 мкм. Таким образом, показатели точности в области измерений резьбовых калибров, полученные на эталоне ВНИИМ, не уступают аналогичным данным, заявленным зарубежными национальными метрологическими институтами. Это подтверждается значениями, приведенными в сводной таблице, на основании данных об измерительных возможностях метрологических институтов согласно базе BIPM [4]. Сравнительная информация представлена по актуальным результатам внедрения эталона. Эталон, разработанный во ВНИИМ, позволяет охватить резьбовые калибры большого диапазона номинальных диаметров, т. е. применим для калибров-пробок 0,75—800 мм и калибров-колец 3—350 мм.

Заключение. Государственный эталон 1-го разряда единицы длины — метра является современной автоматизированной измерительной системой, не уступающей по метрологическим характеристикам лучшим мировым аналогам. Введение эталона в эксплуатацию позволит расширить калибровочные возможности института в области измерений эталонных мер внутреннего и наружного диаметров, а также резьбовых калибров. Расширена общая номенклатура поверяемых и калибруемых СИ. Высокая степень автоматизации эталона и интеграция с программными средствами позволили значительно снизить трудоёмкость выполняемых измерений.

В качестве возможных перспектив исследования и совершенствования эталона можно обозначить распространение области его применения на конические резьбовые калибры. Во всех приведённых выше случаях речь идёт о

Возможности ведущих национальных метрологических институтов в области измерений параметров резьбовых калибров

Национальный метрологический институт	СИ среднего диаметра	Диапазон измерений среднего диаметра для пробки/кольца, мм	Расширенная неопределённость для пробки/кольца, мкм
PTB (Германия)	КИМ (Leitz PMM 866, Leitz Infinity 12.10.7)	5—700/5—600	2
METAS (Швейцария)	Горизонтальный длиномер	2—100/4—100	1,8
NIST (США)	КИМ (Leitz PMM 866)	1—500	1,25
China NIM (Китай)	КИМ (MasterScanner)	1—50/2,5—60	3
MIRS (Словения)	КИМ (SIP CMM5)	1—300/6—30	Q [2,5; 4,5L], L — в метрах
HMI (Хорватия)	Длиномер (Octagone LMM 300)	1—60/4—60	3
CMI (Чехия)	Длиномер (SIP 1002M)	0,75—6	3
SP (Швеция)	Длиномер	1,5—75/3—70	2,5/3,5
MIKES (Финляндия)	Длиномер (SIP 550M), КИМ (Mitutoyo Legex 9106)	3—150	2
UME (Турция)	Длиномер (Mahr 828CiM), КИМ (PRISMO Zeiss)	3—70; 5—700/3—70; 5—600	2,3/2,5; 3
VNIIM	КИМ (Olivetti 185B)	10—500	Q [1; 8×L], L — в метрах
	Длиномер (Labconcept NANO 1100)	(0,75—800)/(3—350)	Q [0,7; 5×L], L — в метрах

калибрах цилиндрической резьбы. Существует тип резьбовых соединений, у которых образующая резьбы является конусом, при этом средний диаметр измеряется в основной плоскости, положение которой на оси резьбы нормируется относительно торца калибра. Задача определения диаметра в этом случае осложняется необходимостью точного определения положения плоскости, в которой осуществляется каждое измерение. В общем случае это означает введение дополнительной координатной оси в схему горизонтального длиномера. В настоящее время методические разработки уже проводятся во ВНИИМ. В 2015 г. планируется задействовать эталон в международных сличениях мер наружного и внутреннего диаметров в рамках КОOMET.

Л и т е р а т у р а

1. Москалев А. А. Особенности поверки калибров замковой резьбы // Лучший молодой метролог КОOMET-2009: Сб. докл. III меж. конкурса. Минск: БелГИМ, 2009.
2. Димов Ю. В. Метрология, стандартизация и сертификация. СПб.: Питер, 2013.
3. Бурдун Г. Д., Бирюков Г. С., Богуславский М. Г., Колчин О. М., Лоповок Т. С., Моисеев В. С., Эйдинов В. Я. Линейные и угловые измерения. М.: Изд-во стандартов, 1977.
4. Mosckalev A. A. High-accurate measurements of thread gages using the Labconcept NANO horizontal instrument // Metrology and metrology assurance 2014 Proc. 24th Nat. sci. symp. with int. participation. Sozopol (Болгария), 2014. P. 480—485.

Дата принятия: 28.04.2015 г.