



**Ключевые слова:**  
координатно-измерительные приборы, машины и системы, программное обеспечение для координатных измерений, контроль геометрических параметров конических резьбовых калибров

# РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ КООРДИНАТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ РЕЗЬБОВЫХ КОНИЧЕСКИХ КАЛИБРОВ

**Игорь СУРКОВ**

Приведено описание разработанной методики и программного обеспечения для координатных измерений геометрических параметров конических резьбовых калибров. Рассмотрены типовые стратегии измерений на универсальных и специализированных координатно-измерительных приборах, машинах и системах, а также особенности размерно-точностного анализа результатов координатных измерений.

## ВВЕДЕНИЕ

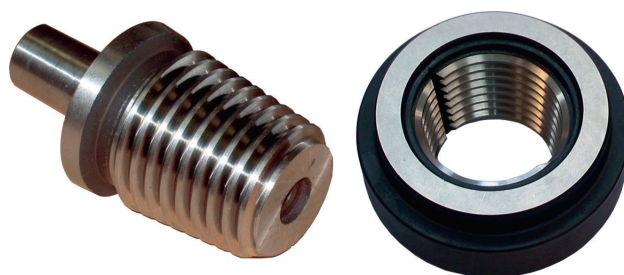
В изделиях машиностроения, металлургии, нефтегазового комплекса одним из важнейших элементов, определяющих надежность и эффективность работы, являются различные резьбовые соединения. Особую сложность представляет обеспечение качества резьбовых соединений в изделиях для нефтегазового комплекса.

Существует большое число вариантов конструкций и типоразмеров конических резьбовых соединений на муфтах и трубах для нефте- и газодобычи, а также в оборудовании, применяемом в этой отрасли (насосы, забойные двигатели и т.д.). Для обеспечения надежности применяется 100%-ный контроль таких резьбовых соединений. В отличие от других отраслей промышленности, в которых достаточно широко используются различные системы автоматического и автоматизированного контроля, в нефтегазовом секторе для комплексного контроля резьбовых соединений используют резьбовые конические калибры [1, 2]. Поэлементный контроль геометрических параметров резьбовых поверхностей в основном выполняют с помощью ручных универсальных и специальных измерительных приборов (конусомеры, шагомеры, высотомеры и др.). Следует отметить, что комплексный контроль калибрами более производителен и требует меньшей квалификации персонала.

Сам калибр – это дорогостоящий прецизионный продукт высокотехнологичного инструмен-

тального производства (рис. 1). Интенсивное использование резьбовых калибров в цехах и метрологических лабораториях приводит к значительному износу и потере точности. Износ калибров допускается только до определенного предела, величина которого приблизительно равна допуску на его изготовление.

Следовательно, необходимо достаточно часто проводить калибровку рабочих и контрольных резьбовых калибров. Комплексный контроль (определение натяга припасованной пары калибров) обязательно дополняется поэлементными измерениями основных геометрических параметров резьбовых конических калибров. Эти измерения производятся в процессе изготовления и при окончательном контроле у производителя, а также в процессе периодической калибровки в лаборато-



**Рис. 1.** Конические калибр-пробка и калибр-кольцо с треугольным профилем резьбы



Рис. 2. Измерение внутреннего диаметра трапецидальной резьбы

рии заказчика, независимых метрологических центрах или у производителя (обычно совмещается с ремонтом).

В существующих методиках выполнения измерений [3] и поверки [4] (по мнению авторов правильнее применять термин «калибровка», так как калибр – это средство допускового контроля, а не измерения) рекомендуется использовать в основном устаревшие ручные универсальные и специализированные средства измерения. Процессы измерений геометрических параметров резьбовых конических калибров выполняются с низкой производительностью и требуют высококвалифицированного персонала (рис. 2).

Учитывая современные тенденции развития методов и средств контроля, требуется автоматизировать процесс измерения и обработку метрологической информации. Необходимо внедрять новые методы и средства контроля, в том числе наиболее эффективные на сегодняшний день координатные измерительные машины (КИМ), приборы (КИП) и системы (КИС) различных компоновок и типов размеров. Положенный в основу их работы координатный метод измерения является наиболее универсальным и может эффективно применяться для автоматизированного контроля практически всех требуемых геометрических параметров широкой номенклатуры прецизионных деталей и инструментов (в том числе резьбовых конических калибров) [5].

В методике [4] предложено использовать для контроля части параметров резьбовых калибров универсальную КИМ. Однако описанная методика координатных измерений является упрощенной, по сути КИМ рекомендуется применять как обычный длинномер с наладкой для двухкоординатных измерений.

## ПРЕДПОСЫЛКИ РАЗРАБОТКИ НОВОГО МЕЖГОСУДАРСТВЕННОГО СТАНДАРТА

Специалисты Челябинского научно-исследовательского и конструкторского института средств контроля и измерения в машиностроении (ЗАО «ЧелябНИИконтроль») обладают большим опытом в области координатной метрологии. Уже более десяти лет, в соответствии с планом НИОКР ЗАО «ЧелябНИИконтроль», выполняется разработка новой серии многофункциональных измерительных приборов и систем модульной конструкции, предназначенных для высокоточных измерений деталей и инструментов со сложнопрофильными поверхностями, в том числе специализированных КИП и КИС [6, 7].

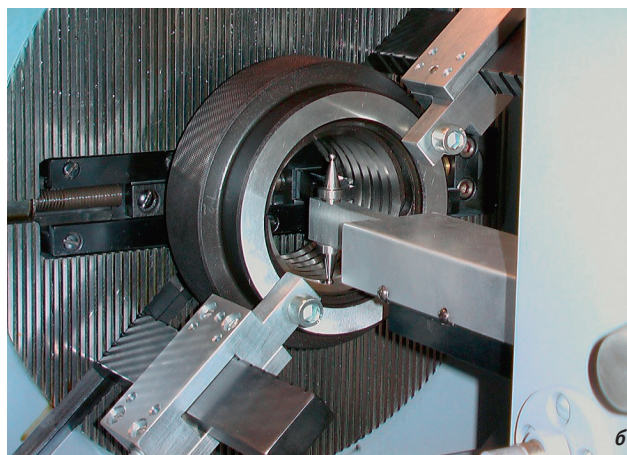


Рис. 3. Двухкоординатный измерительный прибор НИИК-481KM2: а – общий вид прибора, б – измерение калибра-кольца



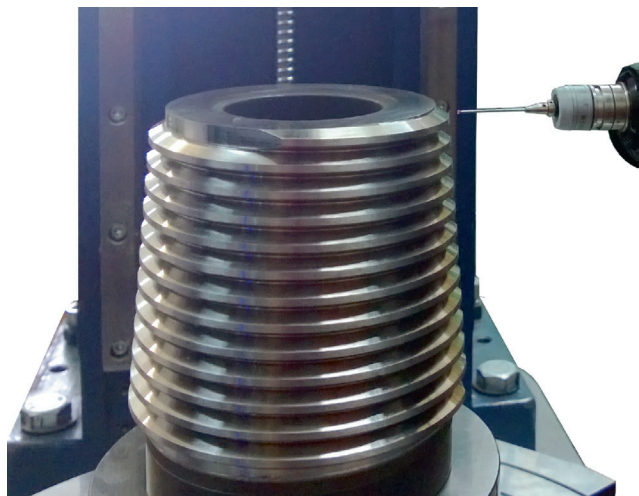


Рис. 4. Контроль конического резьбового калибра-пробки на КИС НИИК-483

В 2006–2008 годах был спроектирован, изготовлен, прошел государственные испытания и внесен в Госреестр средств измерения двухкоординатный измерительный прибор НИИК-481КМ2, предназначенный для измерения геометрических параметров резьбовых конических калибров нефтегазового сортамента (рис. 3). Управление прибором и перемещение узлов осуществляет оператор, съем измери-

тельной информации, расчеты и оформление протоколов автоматизированы за счет использования программного обеспечения (ПО) «ТЕХНОкоорд».

В 2008–2016 годах выполнен большой объем НИОКР, изготовлены и испытаны несколько прототипов новых четырехкоординатных измерительных систем с компьютерным управлением – НИИК-483 и НИИК-485 [6]. Компоновка четырехкоординатных КИС с вертикальной осью вращения обеспечивает выполнение автоматизированных циклов контроля геометрических параметров разнообразных высокоточных деталей и инструментов со сложнопольными поверхностями, в том числе резьбовых конических калибров (рис. 4, 5).

Одним из вариантов использования разработанной ЗАО «ЧелябНИИконтроль» оптико-электронной измерительной системы НИИК-890 «ОпТИС» [5] является контроль резьбовых калибров-пробок (рис. 6). Рост производительности операций контроля достигается за счет использования технологии «Системы технического зрения» для автоматического распознавания кромки измеряемой детали. Эта технология, реализованная в программном модуле «ТЕХНОкоорд-ОпТИС», позволяет применять многоточечные стратегии двухкоординатных оптических измерений для контроля геометрических параметров сложнопольных поверхностей, в том числе резьбовых.

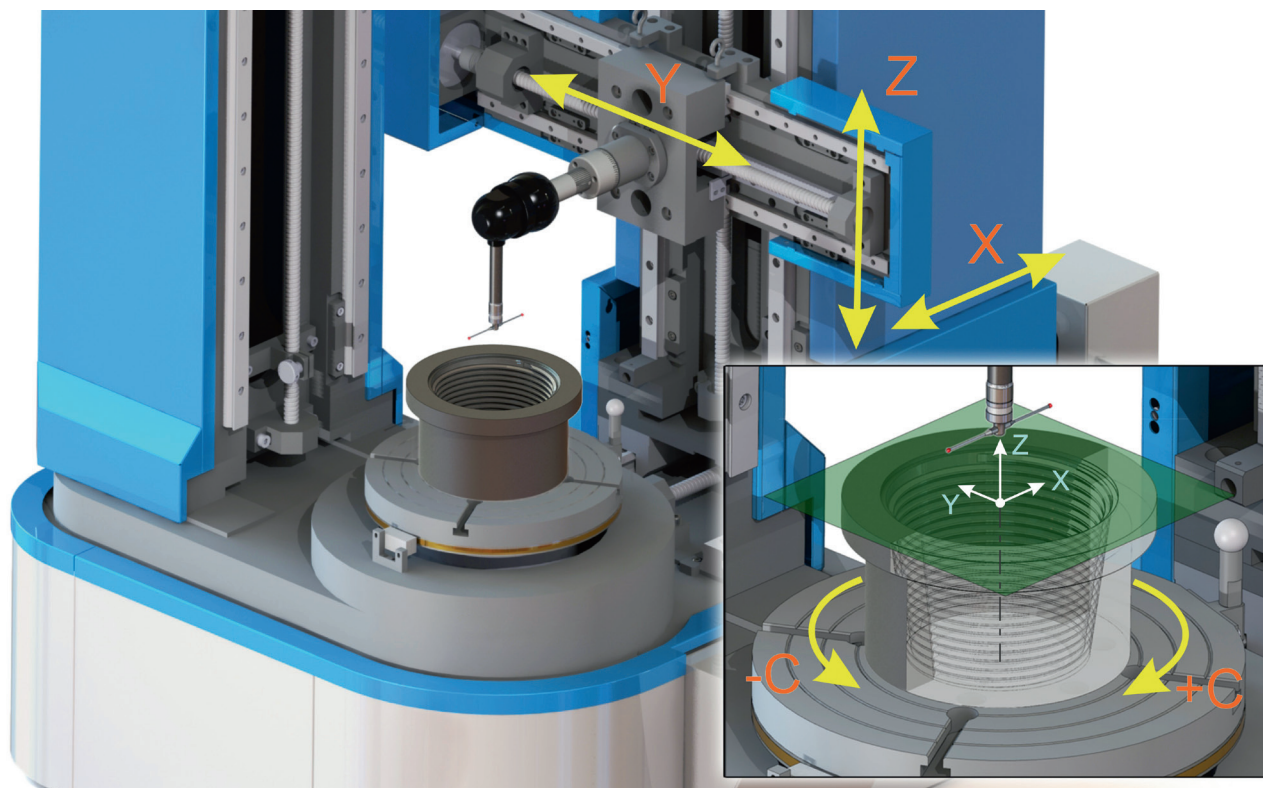


Рис. 5. Схема контроля конического резьбового калибра-кольца на КИС НИИК-485



Рис. 6. Контроль конического резьбового калибра-пробки с помощью измерительной системы НИИК-890 «ОптИС»

В рамках плана НИОКР на стадиях проектирования, изготовления и испытаний новых измерительных приборов и систем проводятся масштабные теоретические и экспериментальные исследовательские работы:

- определяются факторы, влияющие на погрешность определения координат массива точек, принадлежащих измеряемым деталям (поверхностям);
- разрабатываются методики объемной калибровки КИМ и КИС для компенсации систематических погрешностей;
- проводятся исследования и разработки методик координатных измерений для определения геометрических параметров различных деталей и инструментов, в том числе со сложнопрофильными поверхностями;
- формируются рекомендации по выбору оптимальных стратегий и методов аппроксимации заменяющих поверхностей при многоточечных координатных измерениях.

Большой объем экспериментальных исследований проводится в новой центральной измерительной лаборатории, оснащенной современными средствами измерения и контроля как собственного производства, так и выпускаемыми ведущими российскими и зарубежными предприятиями (рис. 7). Наличие вибронезависимого фундамента и современной промышленной климатической системы обеспечивает требуемые для метрологических лабораторий условия проведения высокоточных измерений.

Результаты научных исследований используются не только при проектировании и производстве новых измерительных приборов и систем, создании ПО для

координатных измерений, но и для разработки нормативной документации: методик измерений, поверки и калибровки, технических условий, стандартов.

Для унификации стандартных средств и методов контроля геометрических параметров резьбовых и гладких конических калибров нефтегазового сортамента, а также внедрения в практику работы метрологических подразделений координатных методов измерения, специалистами ЗАО «ЧелябНИИконтроль» был разработан проект межгосударственного стандарта «Калибры для соединений с конической резьбой обсадных, насосно-компрессорных, бурильных и трубопроводных труб. Методика калибровки» [8]. В настоящее время окончательная редакция проекта стандарта проходит обсуждение и доработку в рабочей группе РГ5 «Контроль резьбовых соединений» подкомитета ПК7 «Трубы нарезные нефтяного сортамента» технического комитета по стандартизации ТК357 «Стальные и чугунные трубы и баллоны».

Проведя анализ достоинств и недостатков предыдущих стандартов [3], [4], отраслевых методик измерения, нормативных документов передовых инструментальных предприятий в проекте стандарта были объединены в единый комплекс разнообразных традиционных средств и методы измерения геометрических параметров резьбовых калибров, а также добавлены разработанные специалистами ЗАО «ЧелябНИИконтроль» типовые методики координатных измерений.

В проекте стандарта подробно описаны не только особенности координатных измерений резьбовых калибров на специализированных КИП и КИС



Рис. 7. Центральная измерительная лаборатория ЗАО «ЧелябНИИконтроль»



производства ЗАО «ЧелябНИИконтроль», но и приведены варианты типовых методик координатных измерений, которые могут быть реализованы как на универсальных, так и специализированных координатных измерительных машинах, приборах и системах других производителей.

### РАЗРАБОТКА ТЕРМИНОЛОГИИ В ОБЛАСТИ КООРДИНАТНОЙ МЕТРОЛОГИИ

В последние 25 лет научно-практическая, учебная и справочная литература, посвященная современным проблемам координатной метрологии, средствам и методам координатных измерений геометрических параметров деталей в России не издавалась. В рекламных каталогах приведены в основном общие рассуждения о «великолепных», «превосходных», «уникальных» качествах предлагаемых средств измерения, но практически отсутствуют данные для прямого сравнения технических характеристик координатных измерительных машин различных производителей и анализа метрологических возможностей программного обеспечения, очень много ошибок в терминологии. Например, в разных публикациях вместо термина «измерительная головка (ИГ)» используют такие понятия, как «щуп», «сенсор», «датчик». «Щупом» могут назвать также «измерительный наконечник (ИН)», «удлинитель ИГ», «поворотный узел ИГ» и т.д. Отраслевой руководящий документ РД2 БВ00-9-90 «Координатные измерения размеров и геометрических параметров. Основные положения. Терминология» [9] был разработан в 1990 году и не получил широкого распространения. Приведенные в нем термины и определения во многом устарели и не охватывают всех возможностей современных средств и методов координатных измерений.

Используя в качестве базы положения РД2 БВ00-9-90, специалисты ЗАО «ЧелябНИИконтроль» разработали и ввели в проект межгосударственного стандарта [8] основные понятия и термины координатной метрологии, а также термины, описывающие особенности измерений геометрических параметров резьбовых конических калибров.

### РАЗРАБОТКА ТИПОВЫХ МЕТОДИК КООРДИНАТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ РЕЗЬБОВЫХ КАЛИБРОВ

Методика координатных измерений (МКИ) включает в себя стратегию измерения (число точек, их расположение на контролируемых поверхностях, последовательность обхода) и расчетную модель, математически описывающую взаимосвязь координат измеренных точек с определяемыми

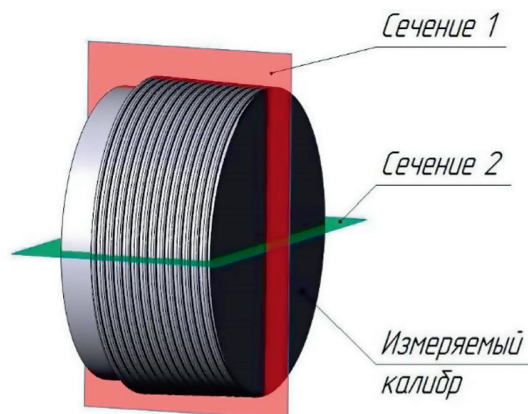


Рис. 8. Схема расположения измеряемых сечений

линейно-угловыми параметрами. МКИ – это основа эффективного ПО для координатно-измерительной техники.

Разработанные специалистами института варианты МКИ значительно отличаются друг от друга в зависимости от компоновки, функциональных возможностей координатно-измерительного оборудования и используемого ПО, применяемой оснастки, конструктивных особенностей измеряемых калибров, требуемой точности и производительности процесса измерения. К сожалению, ограниченность формата статьи позволяет рассмотреть небольшое число примеров.

Измерение резьбового калибра с помощью как универсальных КИМ, так и специализированных КИС должно проводиться не менее, чем в двух осевых сечениях, расположенных под углом 90° (рис. 8). При этом рекомендуется проводить измерения в большем количестве осевых сечений, если это позволяет возможности координатного измерительного оборудования и ПО. Наилучший результат достигается, если в каждом из продольных сечений проводить измерения всех полных зубьев калибра.

В зависимости от компоновки КИМ и КИС, измерения резьбового калибра разделяют на двухкоординатные и многокоординатные.

При двухкоординатном методе измерения, из-за переустановки калибра из одного сечения в другое, положение оси калибра в системе координат машины (СКМ) изменяется, то есть ось калибра, определенная при измерениях в сечении 1, смещена в СКМ на некоторую неизвестную величину относительно оси калибра, определенной при измерениях в сечении 2 (рис. 8).

Двухкоординатный метод измерения геометрических параметров резьбовых калибров реализован на двухкоординатном приборе 481КМ2 (рис. 3), универсальных измерительных микроскопах и других аналогичных средствах измерения.

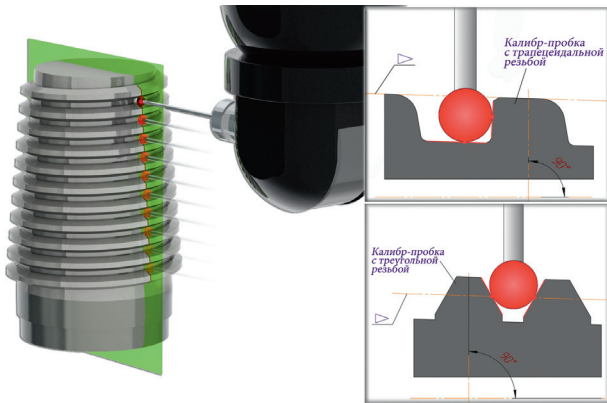


Рис. 9. Схема упрощенного метода измерения

Многокоординатные измерения включают в себя трехкоординатные (три линейные координаты) измерения, выполняемые на универсальных КИМ, и четырехкоординатные (три линейные, одна угловая координаты) измерения параметров резьбовых калибров, реализованные на КИС НИИК-483 и НИИК-485 (или аналогичных). В отличие от двухкоординатного метода измерений, при многокоординатных измерениях не происходит смещение оси калибра в пространстве, так как переустановка калибра не требуется, а перемещение из одного сечения в другое осуществляется за счет поворота стола прибора на заданный угол (специализированная четырехкоординатная система) либо за счет перемещения измерительной головки (универсальные КИМ), то есть положение системы координат детали (СКД) в СКМ остается неизменной.

В зависимости от схемы измерения и используемых ИН выделяют упрощенный и поточечный методы измерений, а также режим сканирования.

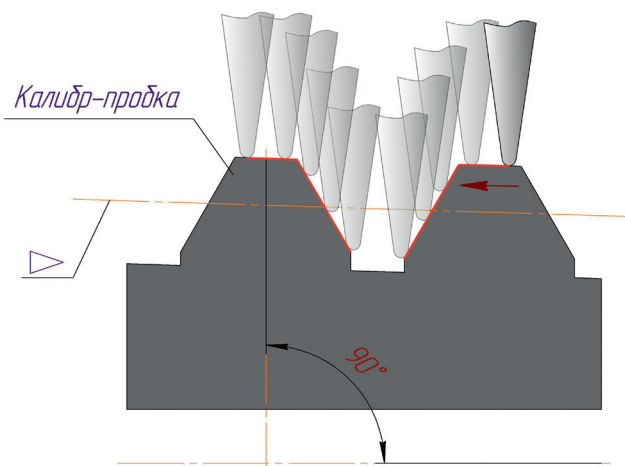


Рис. 10. Схема измерения калибров с треугольным профилем при поточечном методе

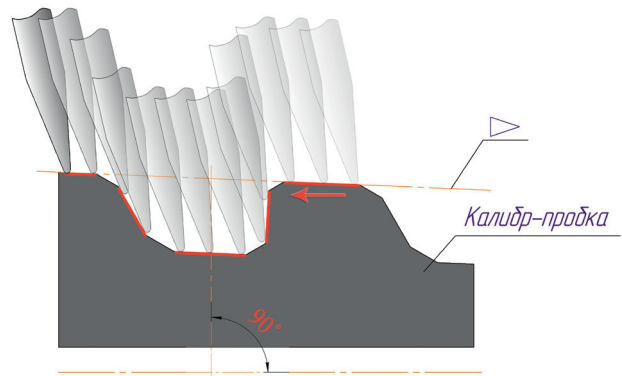


Рис. 11. Схема измерения калибров с трапецидальным профилем при поточечном методе

Упрощенный метод измерения геометрических параметров резьбовых калибров с треугольным профилем основан на использовании сферических измерительных наконечников с диаметром сферы, сопоставимым с диаметром проволочек, применяемых для традиционных методов измерения среднего диаметра резьбы. Упрощенный метод измерения резьбовых калибров с трапецидальным профилем основан на использовании сферических измерительных наконечников с таким диаметром сферы, чтобы обеспечить свободное касание наконечника впадины резьбы и боковой стороны профиля, имеющей угол наклона  $3^\circ$  (рис. 9). Данный метод измерения позволяет измерять наружный, средний и внутренний диаметры, шаг резьбы, конусность, овальность, прямолинейность образующей конуса, перпендикулярность измерительной плоскости к оси резьбы.

Поточечный метод измерения геометрических параметров резьбовых калибров производится в основном с помощью триггерной ИГ. Стратегия основана на выполнении последовательности единичных циклов измерения заданного массива точек. Используются универсальные ИН с малым диаметром сферы или ИН типа «игла» (рис. 10 и 11), что позволяет получить массив координат точек, принадлежащих элементам профиля резьбовой поверхности измеряемого сечения. Дополнительно, по сравнению с упрощенной методикой, можно определить угол наклона боковой стороны профиля резьбы, высоту профиля резьбы, прямолинейность боковых сторон профиля резьбы.

Режим сканирования (рис. 12) обеспечивает измерение большого количества точек при непрерывном контакте ИН с измеряемой поверхностью. Рекомендуемая дискретность (интервал между фиксируемыми точками измерения) составляет менее 0,1 мм. Дополнительно к вышеперечисленным измеряемым параметрам появляется возможность оценить размеры фасок и радиусов скругле-

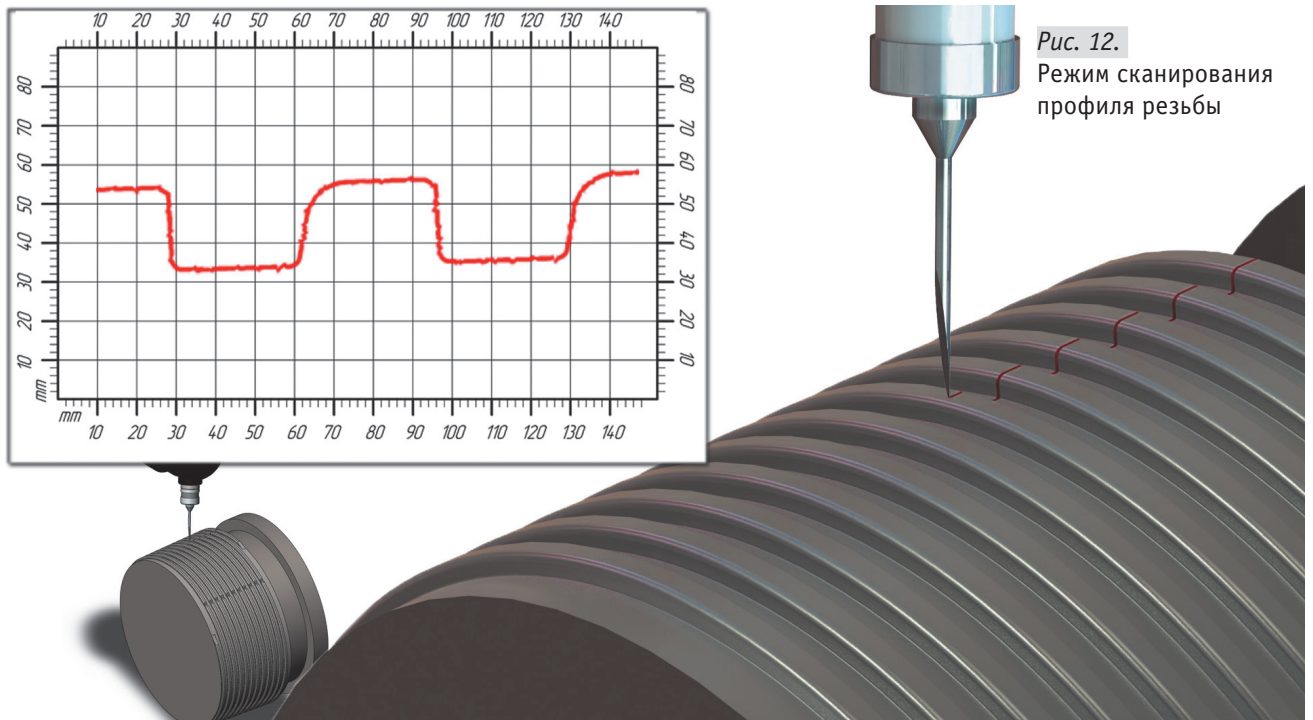


Рис. 12. Режим сканирования профиля резьбы

ний (что необходимо в процессе производства), а также степень износа поверхностей (калибровка в процессе эксплуатации).

Недостатком измерений в ограниченном количестве продольных сечений является большая вероятность упустить места локализации максимальных погрешностей формы. В дополнение к вышеописанным стратегиям измерений впервые разработана и предложена стратегия измерения и методика анализа трехмерной спирали.

Определение действительных размеров и положения спирали относительно оси калибра проводят сканирующей ИГ с помощью поворотного стола, обеспечивающего вращение калибра (рис. 13). Для калибров с треугольным профилем резьбы положение спирали относительно оси калибра измеряют

по среднему диаметру, для калибров с трапециевидальным профилем – по наружному диаметру (для кольца) или внутреннему (для пробки). При этом (по аналогии с упрощенным методом измерений), измерительный наконечник вводится в контакт с боковыми сторонами профиля (для резьбы с треугольным профилем), либо с впадиной резьбы и боковой стороной профиля, имеющей угол наклона  $3^\circ$  (для резьбы с трапециевидальным профилем) таким образом, чтобы обеспечить натяг, равный половине диапазона отклонения ИГ по осям X, Y, Z. Затем осуществляя перемещение ИН по номиналь-

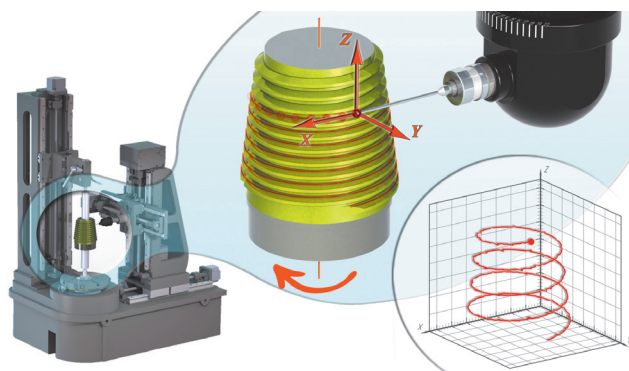


Рис. 13. Определение действительных размеров и положения спирали относительно оси калибра

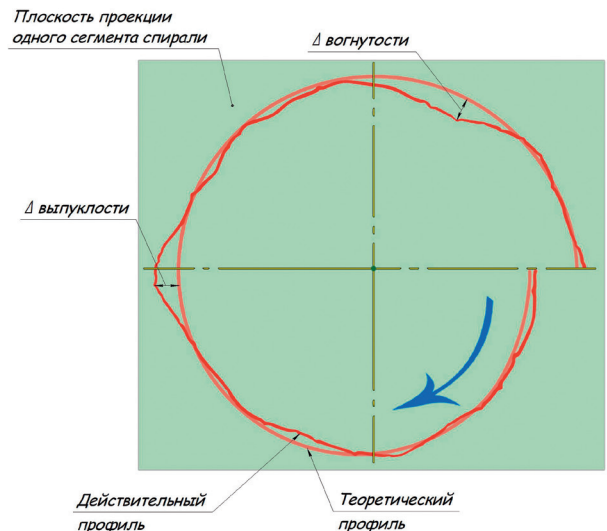


Рис. 14. Анализ проекции одного сегмента спирали



Доминирующая погрешность образующей конуса

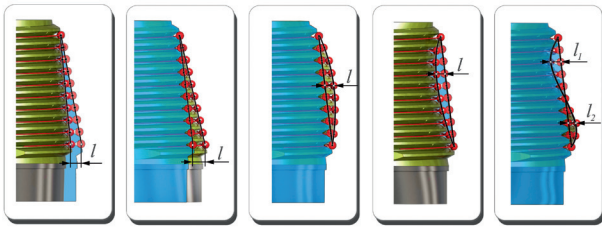


Рис. 15. Анализ доминирующей погрешности образующей конуса

ной траектории (за счет вращения калибра и линейного перемещения ИГ вдоль образующей конуса), ПО КИМ фиксирует координаты точек спирали.

Анализ трехмерной спирали в поперечных сечениях (комплект плоскостей перпендикулярных оси для каждого сегмента спирали, рис. 14) позволяет выявить величину и положение максимальных отклонений формы. Выпуклости по условию максимума материала оказывают существенное влияние на величину натяга при припасовке пробки и кольца.

Практически бесконечное количество доступных для анализа продольных сечений позволяет определить максимальную величину и характер доминирующих погрешностей образующей конуса (рис. 15), шага резьбы, отклонений от прямолинейности оси и т.д.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты научных исследований, выполненных специалистами ЗАО «ЧелябНИИконтроль», используются не только для проектирования и производства новых измерительных приборов и систем, но и для разработки эффективных методик измерений и нормативной документации. Типовые МКИ резьбовых конических калибров включены в проект нового межгосударственного стандарта. Для реализации типовых МКИ на четырехкоординатной измеритель-

ной системе (типа НИИК-483 или НИИК-485) разработан программный модуль «ТЕХНОкоорд-Резьба» для ПО «ТЕХНОкоорд-4К» (рис. 16).

## ЛИТЕРАТУРА:

- ГОСТ 8867 — 89 Калибры для замковой резьбы. Виды. Основные размеры и допуски. — М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. 10 с.
- ГОСТ Р 51906-2015. Соединения резьбовые обсадных, насосно-компрессорных труб и трубопроводов и резьбовые калибры для них. Общие технические требования. — М.: Стандартинформ, 2016. 58 с.
- МИ 1812-87. Методические указания. Калибры резьбовые конические. Методика контроля. — М.: Издательство стандартов, 1988. 49 с.
- МИ 2828-2003. Государственная система обеспечения единства измерений. Калибры эталонные, контрольные и рабочие для резьбовых соединений обсадных труб и муфт к ним. Методика поверки. — СПб, 2003. 25 с.
- Surkov I.V.** Development of methods and means of coordinate measurements for linear and angular parameters of cutting instruments / Measurement Techniques. Vol. 54. Is. 7 (2011). P. 758–763.
- Сурков И.В., Буртовая А.И.** Разработка оборудования и программного обеспечения для координатных измерений прецизионных деталей и инструментов со сложнопрофильными поверхностями // Тезисы докладов 23-го национального научного симпозиума с международным участием “Metrology and metrology assurance 2013” / Созополь (Болгария): 2013 (ISSN 1313-9126). С. 186–191.
- Каталог продукции ЗАО «ЧелябНИИконтроль». Измерительные приборы, системы автоматизированного контроля и управления — 2016. — Режим доступа: <http://www.toolmaker.ru/docs/Katalog.pdf> — 23.01.2017.
- ГОСТ Калибры для соединений с конической резьбой обсадных, насосно-компрессорных, бурильных и трубопроводных труб. Методика калибровки [Электронный ресурс]. — Проект, окончательная редакция. — Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации. — Режим доступа: <http://www.toolmaker.ru/docs/gost.pdf> - 23.01.2017.
- Руководящий документ: РД 2 БВ00-9-90. Координатные измерения размерных и геометрических параметров. Основные положения. Терминология. — М.: ВНИИизмерения, 1990. 28 с.

## СУРКОВ Игорь Васильевич —

кандидат технических наук, доцент кафедры технологии автоматизированного машиностроения Южно-Уральского государственного университета, член-корреспондент метрологической Академии РФ, директор ЗАО «ЧелябНИИконтроль»

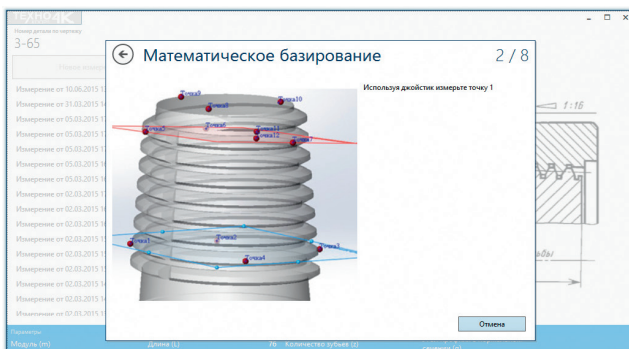


Рис. 16. Программный модуль «ТЕХНОкоорд-Резьба» для ПО «ТЕХНОкоорд-4К»