

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ОСНОВНОЙ ПЛОСКОСТИ КОНИЧЕСКОЙ ДЮЙМОВОЙ РЕЗЬБЫ НА ОСНОВЕ ОБЛАКА ЕЕ ТОЧЕК ОТ КООРДИНАТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ

**И.А. Щуров<sup>1</sup>**, *shchurovia@susu.ru*, <https://orcid.org/0000-0003-4254-6354>

**В.Г. Шаламов<sup>1</sup>**, *shalamovvg@susu.ru*

**А.В. Морозов<sup>2</sup>**, *ntk\_2005@rambler.ru*

<sup>1</sup> Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

<sup>2</sup> Владимирский государственный университет им. А.Г и Н.Г. Столетовых, Владимир, Россия

**Аннотация.** Традиционно контроль изготавливаемых резьбовых поверхностей принято выполнять с использованием предельных калибров. Однако в единичном или мелкосерийном типах производства деталей с нестандартными резьбами изготовление дорогостоящих специальных калибров становится нерентабельным. Тенденция последних десятилетий, связанная со снижением серийности производства, обуславливает все более широкое применение универсальных средств измерений и прежде всего координатно-измерительных машин (КИМ). Для контроля метрических или упорных цилиндрических резьб, точность которых согласно стандарту определяется приведенным средним диаметром, разрабатываются методики его расчета по полученным от КИМ облакам точек. В случае конических резьб их точность необходимо определять положением их основных плоскостей. Такое положение, а именно расстояние от данной радиальной плоскости до торцовой плоскости резьбовой части детали, должно находиться в заданных допуском пределах. Для расчета этого расстояния в данной работе предложено использовать прилегающие к полученному на КИМ облаку точек две смежные идеальные винтовые поверхности, которые вместе как калибр-кольцо с заданным собственным средним диаметром определяют искомую плоскость. Выполненные по предлагаемой методике расчеты облака точек для случая дюймовой конической резьбы показали соответствие найденного расстояния осевого положения основной плоскости указанным в стандарте значениям. При этом исследованиями было установлено, что точность расчетов существенно зависит от точности определения координат точек резьбы. Приемлемый по точности расчет (0,2 %) был получен при определении координат точек резьбы с точностью 5 мкм, что достижимо при использовании ряда оптических КИМ. Предложенный подход может применяться и для случая свинчивания наружной трубной конической резьбы с внутренней цилиндрической резьбой. Таким образом, приведенные в статье результаты исследований имеют перспективы и требуют дальнейшего совершенствования, например, для определения осей идеальных винтовых поверхностей, прилегающих к облаку точек реальной резьбы.

**Ключевые слова:** коническая резьба, основная плоскость, координатно-измерительная машина, облако точек, прилегающая винтовая поверхность, калибр-кольцо

**Для цитирования:** Щуров И.А., Шаламов В.Г., Морозов А.В. Определение положения основной плоскости конической дюймовой резьбы на основе облака ее точек от координатно-измерительной машины // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». 2024. Т. 24, № 4. С. 88–100. DOI: 10.14529/engin240407

Original article

DOI: 10.14529/engin240407

## DETERMINATION OF THE POSITION OF HANDTIGHT ENGAGEMENT PLANE OF A TAPERED INCH THREAD BASED ON THE CLOUD OF POINTS FROM COORDINATE MEASURING MACHINE

I.A. Shchurov<sup>1</sup>, shchurovia@susu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4254-6354>

V.G. Shalamov<sup>1</sup>, shalamovvg@susu.ru

A.V. Morozov<sup>2</sup>, ntk\_2005@rambler.ru

<sup>1</sup>South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

<sup>2</sup>Vladimir State University named after A. and N. Stoletovs, Vladimir, Russia

**Abstract.** Traditionally, control of manufactured threaded surfaces is carried out using gauges. However, in single-piece or small-scale production of parts with non-standard threads, the production of expensive special gauges becomes unprofitable. The trend of recent decades, associated with a reduction in serial production, has led to the increasingly widespread use of universal measuring equipment and, above all, coordinate measuring machines (CMM). To control metric or buttress cylindrical threads, the accuracy of which, according to the standard, is determined using the virtual pitch thread diameter, a number of methods have been developed to calculate this diameter using point clouds from CMMs. In the case of tapered threads, their accuracy must be determined by the position of their planes of handtight engagement. This position, namely: the distance from this plane to the end plane of the threaded part has to be within the limits specified by the tolerance. To calculate that distance, the presented paper proposes to use two continuous ideal helical surfaces adjacent to the point cloud obtained from the CMM. These two surfaces together, like a ring gauge with a given virtual pitch thread diameter, define the desired plane. The calculations of the point cloud for the case of an inch tapered thread, performed using the proposed method, showed that the distance of the axial position of the plane corresponds to the values specified in the standard. At the same time, it has been established that the accuracy of calculations significantly depends on the accuracy of determining the coordinates of the thread points. An acceptable accuracy calculation (0.2%) was obtained when determining the thread points coordinates with an accuracy of 5  $\mu\text{m}$ , which is achievable using some of optical CMMs. The proposed approach can also be applied for the case of screwing an external tapered threads with an internal cylindrical thread. Thus, the research results presented in this article have prospects and require further improvement, for example, in order to determine the axis of ideal screw surfaces adjacent to the point cloud of real threads

**Keywords:** tapered thread, hand tight engagement plane, coordinate measuring machine, point cloud, adjacent helical surface, ring gauge

**For citation:** Shchurov I.A., Shalamov V.G., Morozov A.V. Determination of the position of handtight engagement plane of a tapered inch thread based on the cloud of points from coordinate measuring machine. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2024:24(4):88–100. (In Russ.) DOI: 10.14529/engin240407

### Введение

Большинство деталей машиностроения имеет в своем составе резьбовые поверхности. Часть этих резьб используется для присоединения к одним деталям других деталей посредством крепежных элементов: винтов, болтов, шпилек. Другая часть резьб предназначена для свинчивания подобных деталей с другими прилегающими к ним деталями, имеющими собственные ответные резьбы соответствующего диаметра. В последнем случае повышение точности резьбы по сравнению с первыми – крепежными резьбами – часто является необходимостью. При производстве таких резьб требуется соответствующий контроль. Как известно, способ определения точности резьбы зависит от ее типа. Например, точность цилиндрической метрической резьбы определена ГОСТ 16093-2004 (ИСО 965-1:1998, ИСО 965-3:1998) «Основные нормы взаимозаменяемости. Резьба метрическая. Допуски. Посадки с зазором». В соответствии с п. 4.3 данного стандарта степени точности резьбы определены допусками ее среднего диаметра, который является суммарным. Другим стандартом, а именно ГОСТ 11708-82 «Резьба. Термины и определения», п. 60,

определенено, что суммарный допуск – «допуск, ограничивающий отклонения как приведенного среднего диаметра, так и среднего диаметра резьбы». В п. 59 этого стандарта определено, что приведенный средний диаметр цилиндрической резьбы – это «средний диаметр воображаемой идеальной цилиндрической резьбы, которая имеет те же шаг и углы наклона боковых сторон, что и основной или номинальный профиль резьбы, и длину, равную заданной длине свинчивания и которая плотно, без взаимного смещения или натяга, сопрягается с реальной резьбой по боковым сторонам резьбы». Понятие среднего диаметра цилиндрической резьбы (зачастую он называется собственно средним диаметром) определено в п. 31 указанного стандарта через образующую прямую линию цилиндра, отрезки которой, отделяемые профилем резьбы, равны между собой на впадине и на выступе резьбового профиля. Диаметр такого цилиндра является собственно средним диаметром резьбы. Очевидно, что этот диаметр у реальной резьбы может соответствовать стандартному значению, тогда как ее приведенный средний диаметр может существенно отличаться от заданной величины. Приведенное отличие, очевидно, может быть связано с различными погрешностями реальной резьбы, к числу которых можно отнести дугообразное искривление ее оси. На винт с точным собственно средним диаметром такой резьбы требуемая гайка (или предельный резьбовой калибр) может не навинтиться, особенно если длина свинчивания имеет существенную величину. Обеспечение требований свинчиваемости и гарантируются выполнением допусков приведенного среднего диаметра как винта, так и гайки, и именно поэтому предельными резьбовыми калибрами с практически идеальными винтовыми поверхностями, как правило, контролируется годность резьбы.

Определение точности конических резьб существенно отличается от вышеприведенных требований для цилиндрических резьб.

Это связано с особенностью расположения направляющих винтовых линий, которыми задаются винтовые поверхности конической резьбы – расположением этих линий на конусах. В общем случае любые две такие поверхности одинакового шага могут быть свинчены друг с другом. Однако если резьба винта будет иметь в так называемой основной радиальной плоскости больший средний диаметр, чем средний диаметр гайки в такой же плоскости, то длина их свинчивания окажется меньше требуемой. В связи с этим необходимо контролировать средний диаметр в указанных плоскостях и у винта, и у гайки. В результате этого требуемая длина свинчиваемости конических резьб обеспечивается требуемым расположением основных плоскостей как винта, так и гайки.

Выше было отмечено, что точность цилиндрической резьбы контролируется проходным и не-проходным предельными калибрами, которые имеют приведенный средний диаметр, близкий к идеальному с некоторыми отклонениями (определяются допусками по степени точности контролируемой резьбы) в большую и меньшую стороны, что и определяет навинчивание или отсутствие навинчивания этих калибров на реальную резьбу. В случае конической резьбы, как было сказано выше, навинчивание калибра всегда осуществимо, но длина этого навинчивания будет зависеть от диаметральных размеров реальной конической резьбы. Согласно разделу II из ГОСТ 6111-52 «Резьба коническая дюймовая с углом профиля  $60^\circ$ » контрольное кольцо при навинчивании на трубу с ее торца (он имеет минимальный диаметр) должно иметь расположение своего торца точно в основной плоскости конической резьбы детали. Пунктом 2 данного стандарта установлено, что «резьбу трубы (наружную) проверяют по среднему диаметру резьбовым калибром-кольцом по ГОСТ 6485. Осевое смещение основной плоскости трубы относительно номинального расположения не должно превышать  $\pm P$  (шаг резьбы)». Примерно таким же образом с использованием предельных калибров контролируются и другие конические резьбы: метрическая, трубная, замковая, насосно-компрессорных труб, а также различные резьбы по зарубежным стандартам. Для части резьб инструментальными заводами серийно выпускаются предельные калибры. В других случаях необходимо заказывать изготовление таких калибров, что в мелкосерийном и единичном типах производства деталей с коническими резьбами существенно увеличивает их себестоимость. В связи с этим и возникает задача контроля резьб имеющимися на предприятиях координатно-измерительными машинами (КИМ). Очевидно, что при контроле конических резьб посредством КИМ необходимо иметь такую методику расчета, которая позволит по облаку точек поверхности резьбы получить фактическое расстояние от ее меньшего торца до ее основной плоскости.

Необходимо отметить, что применяемые в современных условиях КИМ позволяют получать облака точек резьбовых поверхностей с микронной точностью координат, но при этом, как правило, эти КИМ не используются для определения вышеуказанных параметров точности резьб – приведенного среднего диаметра цилиндрической резьбы или положения основной плоскости для конической резьбы [1, 2]. В последнее время производители КИМ предоставляют каталоги, в которых отмечаются возможности контроля резьб [3]. Некоторые подробности реализации этих возможностей раскрываются в технических информационных листках [4]. Однако информацию о том, что именно измеряет КИМ – частные параметры в отдельных осевых плоскостях, такие, как углы профиля резьбы, ее шаг, наружный и внутренний диаметры и через них собственно средний диаметр, или же проверяются некоторые трехмерные данные, например, приведенный средний диаметр, – в данных информационных материалах найти не удалось. Таким образом, практика контроля точности конических резьб через определение положения базовой плоскости не имеет пока еще примеров использования для этих целей координатно-измерительных машин. В связи с этим возникает необходимость анализа научной литературы для поиска имеющихся там решений.

### 1. Анализ литературы, цель исследования, актуальность, методологические вопросы

Приведенный краткий обзор практической стороны контроля резьб показал целесообразность разработки методики определения положения базовой плоскости для конической резьбы на основании облака точек, полученного от КИМ. Этот вывод определил цель предлагаемого исследования. **Целью данного исследования** является разработка методики расчета расстояния от плоскости меньшего торца конической резьбы до ее базовой плоскости с использованием облака точек, получаемого от КИМ. **Актуальность** предлагаемого исследования связана с необходимостью снижения себестоимости изготовления точных специальных конических резьб в единичном и мелкосерийном типах производства в части их контроля, а именно с заменой традиционных дорогостоящих предельных резьбовых калибров контролем посредством универсальных КИМ, для чего и необходима разработка соответствующей методики расчета расстояния от плоскости меньшего торца конической резьбы до ее базовой плоскости с использованием облака точек от КИМ.

Для достижения указанной цели на первом этапе исследования необходимо было произвести **анализ доступной научной литературы**. Прежде всего следует отметить, что для контроля точности резьб на основании облака точек их профилей в осевом сечении все чаще применяются контурографы типа MarSurf LD 130/LD [5]. Однако очевидно, что измерения в одной или нескольких осевых плоскостях не могут быть полноценной заменой определения погрешностей резьбы в трехмерном пространстве. Как было отмечено выше, прогиб оси резьбы, например, в горизонтальной плоскости не может быть определен измерениями в вертикальной плоскости, а такой прогиб, очевидно, изменит условия свинчиваемости болта и гайки. Несмотря на это, исследования в части разработки подобных двумерных средств измерения продолжают развиваться как в части разработки самих устройств [6], так и в части совершенствования методик расчета резьб. Аннотации таких исследований до 1991 года опубликованы в специализированном издании на 67 страницах [7]; обзор более поздних разработок способов и устройств координатных измерений резьб представлен в другой публикации [8]. Несмотря на это, все новые и новые публикации появляются и отражают рассматриваемые здесь вопросы. В частности, опубликован новый метод калибрования КИМ для измерения параметров резьбы [9]. Направленность работы связана с оценкой погрешностей измерений, хотя в целом в данной публикации рассматривается измерение лишь в осевых плоскостях резьбы. Аналогичную направленность и особенность имеют работа из Словении [10], в которой учитывается диаметр шариков щупа измерительной головки КИМ, а также работа турецких исследователей [11], в которой исследуются различия в измерениях внутренних и наружных резьб. Подобные исследования проводятся не только для цилиндрических, но и для конических резьб [12]. Однако и здесь все расчеты производятся в двухмерном пространстве и только для точек, полученных в осевых плоскостях.

Учитывая необходимость рассмотрения погрешностей резьбы в трехмерном пространстве, все чаще проводят исследования с использованием систем технического зрения. В частности, с использованием лазерного устройства было получено облако точек наружной цилиндрической резьбы, для которой далее рассчитаны три стандартных диаметра [13]. Формулы для расчета данных диаметров в статье не приведены. Наряду с лазерными устройствами для контроля резьб применяются камеры для микроскопии [14]. Использование таких камер позволяет получить ко-

ординаты облака точек реальной резьбы с субмикронной точностью. В данной работе отмечается, что точки позволяют определить все необходимые параметры резьбы, однако требуемые для этого зависимости в этой публикации не приведены. Одним из важных вопросов контроля резьб по облакам их точек от КИМ является определение оси реальной резьбы. Определение положения оси связано с выбором системы координат, в которой и производятся необходимые расчеты. Данному вопросу посвящена еще одна публикация [15]. В этой работе авторы рассчитывают облако точек в CAD-программе Solidworks и на основе этого проверяют эффективность предложенной методики. Такой подход, очевидно, заслуживает внимания, поскольку позволяет верифицировать точность предлагаемых авторами расчетов на основе точно рассчитанных координат идеально расположенных в пространстве точек. Подтверждением актуальности данных подходов являются работы, направленные на получение облаков точек для внутренних резьб малого диаметра [16, 17]. В этих работах также показаны результаты расчета диаметров резьб, однако сами необходимые зависимости не приводятся. В одной из работ 2022 г., посвященной получению облака точек с использованием лазерной системы, отмечается, что результаты измерений существенно зависят от положения детали в пространстве относительно средств определения точек поверхности [18], что характеризует некоторые проблемы с оптическими измерениями. Вероятно, в связи с этим примерно в это же время появляются и публикации по измерениям на основе щупов и контактных способов контроля [19]. Здесь также приводятся результаты определения диаметров резьб и также отсутствуют какие-либо формулы для выполненных расчетов. Таким образом, в найденных работах можно обнаружить результаты расчетов диаметральных размеров резьб и других их частных параметров на основе облаков точек в плоскости или в пространстве, полученных контактными или оптическими системами, при этом полный перечень расчетных зависимостей в этих публикациях найти не удалось. Кроме того, в этих работах не обсуждается расчет необходимого для оценки точности цилиндрической резьбы приведенного среднего диаметра. Не обнаружены и расчеты положения основной плоскости конической резьбы, что, как было показано выше, характеризует ее точность.

Одной из отличающихся публикаций является работа немецких авторов [20]. Работа посвящена определению параметров конической резьбы. В работе приводится часть необходимых зависимостей по расчету величин хода резьбы на разных участках, углов профиля и трех ключевых диаметров. Формул для расчета положения основной плоскости конической резьбы или результата такого расчета в данной работе найти не удалось. Другой публикацией, в которой приводятся необходимые зависимости для точностных расчетов цилиндрической резьбы и результаты расчета по ним для некоторого выбранного примера, является работа одного из авторов предлагаемой статьи [21]. В этой публикации на основе координат облака точек поверхности цилиндрической резьбы производится расчет ее приведенного среднего диаметра. В других опубликованных работах этого же автора решаются вопросы определения по облаку точек оси такой реальной резьбы в системе координат КИМ. Поскольку в ГОСТ 6111-52 положение основной плоскости конической резьбы определяется равенством в ее окрестности приведенного среднего диаметра заданной стандартом величине, то расчеты такого диаметра могут оказаться полезными и в определении положения этой плоскости. Согласно рис. 1 рассматриваемого стандарта основная плоскость на винте (трубе) определяется торцом гайки (муфты). В примечании стандарта записано: «1. При свинчивании без натяга трубы и муфты с номинальными размерами резьбы основная плоскость резьбы трубы совпадает с торцом муфты». Как было отмечено выше, точность резьбы трубы проверяют резьбовым калибром-кольцом с параметрами по ГОСТ 6485-69, в котором в исполнении 1 основная плоскость расположена снова на торце этого калибра.

Таким образом, в качестве **гипотезы** можно предположить, что положение основной плоскости конической дюймовой резьбы будет соответствовать торцу идеальной цилиндрической резьбы с приведенным средним диаметром, равным установленному ГОСТ 6111-52 размеру для выбранного размера конической резьбы. Такой подход представляется возможным, исходя из следующих утверждений. Поскольку основная плоскость конической резьбы определена ее средним диаметром (более реальную оценку, как было показано выше, дает приведенный средний диаметр, поскольку речь идет о свинчивании реальной резьбы винта с идеальным калибром-гайкой), а средний диаметр определяется равенством отрезков на выступе резьбы и ее впадине, что характерно и для цилиндрической резьбы, то расчет приведенного среднего диаметра для цилиндриче-

ской резьбы уместен и в случае конической резьбы. Очевидно, что торец калибра с заданным средним диаметром будет навинчен на выступ конической резьбы с таким же диаметром, определяемым по его левой стороне выступа. При рассмотрении резьбы с расположением меньшего ее торца в ее правой части ее правая сторона выступа окажется с меньшим диаметром, поскольку поворот осевой плоскости при смещении витка к меньшему торцу всегда даст уменьшение диаметра в силу конусности этой резьбы. Следовательно, задача определения основной плоскости конической резьбы по ее заданному приведенному среднему диаметру сводится к определению витка и ее осевой плоскости, в которой его ширина будет равна половине шага резьбы. Применительно к облаку точек это означает, что нужно найти такую реальную точку на резьбе, которая удовлетворяет вышеописанному условию. Верификация новой методики расчета, как это было принято в ранее отмеченных работах [15, 21], может быть осуществлена на идеальном облаке точек, полученном расчетным путем. Это и все остальные перечисленные утверждения были положены в основу разработанной методики, приведенной ниже.

**Методология исследования.** Для решения поставленной задачи предлагается использовать численный метод расчета, основанный на использовании координат облака точек конической резьбы, методе последовательных приближений и элементах аналитической геометрии. Порядок определения точностных параметров предлагается заимствовать из вышеуказанных государственных стандартов. **Структура работы.** Первоначально предлагается обсудить расчетные зависимости и описание методики расчета. Далее для ее верификации с использованием разработанной компьютерной программы и типовой CAD-программы будет решена конкретная задача для выбранного размера конической дюймовой резьбы. На основе сравнения полученных данных и сведений из государственного стандарта будет сделан вывод и внесены необходимые уточнения.

## 2. Методика расчета расстояния от плоскости меньшего торца конической резьбы до основной ее плоскости

Как было отмечено выше, расчет этого расстояния связан с расчетом приведенного среднего диаметра в окрестности основной плоскости. Поскольку данная задача была уже решена ранее для случая цилиндрической резьбы [21], то оказалось целесообразным использовать ее и для случая конической резьбы. Также еще раз отметим, что приведенный средний диаметр определяется по прилегающим к точкам реальной резьбовой поверхности идеальным винтовым поверхностям. Если в расчетах точности цилиндрической резьбы необходимо определить такие идеальные поверхности и через них рассчитать искомый диаметр, то в расчетах точности конической резьбы таким диаметром необходимо задаться при расчете положения соответствующей ему основной плоскости резьбы. В такой постановке задача расчета искомой плоскости может быть реализована следующим образом.

Выберем систему координат, связанную с контролируемой деталью. Пусть ось  $Z$  системы проходит по оси резьбы так, что начало системы координат будет расположено примерно в плоскости с меньшим диаметром этой резьбы. Используемая методика [21] позволяет найти минимальные значения аппликаты  $z$  точек и таким образом поместить начало системы координат заготовки на указанном торце с минимальным диаметром резьбы. Вопросы определения положения оси  $Z$  для реальной резьбы также здесь предлагается подробно не рассматривать, можно использовать вышеописанную методику [20], другие методики в публикациях одного из авторов используемой статьи [21] или методики других авторов. В выбранной системе координат по принятой методике [21] для всех точек резьбы на первоначальном нулевом шаге рассчитывается ее приведенный средний диаметр  $d_{2,0}^{np}$ . Очевидно, что в случае конической резьбы он будет соответствовать приведенному среднему диаметру для последнего витка резьбы у ее торца с большими радиусами и с максимальной аппликатой  $z$ . Очевидно также, что в общем случае полученный диаметр будет больше заданного стандартом приведенного среднего диаметра  $d_2^{np}$  в основной плоскости. Следовательно, торцевая плоскость резьбы с большим диаметром не может оказаться ее основной плоскостью.

На следующем первом шаге вычислений из множества координат полученного на КИМ облака точек  $S_0$  удаляются координаты точки с максимальной величиной  $z_i$  и полярным углом  $\phi_i = \arctan(y_i / x_i)$ , равным нулю. Используя это новое множество  $S_1$  в качестве исходного, можно

рассчитать новую величину приведенного среднего диаметра  $d_{2,1}^{np}$ . Такая величина вновь сравнивается с заданной стандартом величиной  $d_2^{np}$ . Если первая оказывается больше второй, то из последнего множества снова удаляются координаты точки с максимальной величиной  $z_{i+1}$  ( $i=1$ ) и полярным углом  $\phi_{i+1} = \arctan(y_{i+1} / x_{i+1})$ , который от точки к точке увеличивается при повороте в направлении от оси  $Y$  к оси  $X$  для выбранной правой системы координат детали в случае правой резьбы и в обратную сторону для левой резьбы. Для полученного множества точек вновь уже на следующем  $i = i+1$  шаге рассчитывается  $d_{2,i+1}^{np}$  и вновь производится сравнение с  $d_2^{np}$ . Указанная процедура повторяется по всем точкам  $i = 1 \dots n$ , где  $n$  – общее число точек, полученных от КИМ, до тех пор, пока  $d_{2,i+1}^{np} \leq d_2^{np}$ . При достижении последнего равенства координата  $z_i$  определит положение  $z_i = l_2$  ( $l_2$  см ГОСТ 6111-52) основной плоскости конической резьбы детали, то есть определит левую торцовую плоскость калибра-кольца, который бы навинчивался на реальную резьбу.

### 3. Пример использования принятой методики расчета для конкретного диаметра резьбы

Выдвинутую выше гипотезу и предложенную методику расчета необходимо подтвердить вычислениями на некотором конкретном примере. В качестве такого примера была выбрана коническая дюймовая резьба  $K1/4"$  ГОСТ 6111-52. Для получения облака точек, как это было отмечено выше, предложено не использовать реальную резьбу от КИМ, что может дать свои дополнительные погрешности, а выполнить расчеты координат этих точек по ранее разработанным формулам. В качестве методики расчета таких координат была использована методика для моделирования резьбообразующих инструментов, в том числе метчиков, опубликованная ранее [22]. В этой методике в качестве исходных параметров были приняты следующие величины. Длина резьбового участка детали 9,5 мм равна длине его рабочего участка  $l_1$  по ГОСТ 6111-52. Максимальный наружный диаметр резьбы 13,8482 мм определен по стандарту как  $13,572 + (9,5 - 5,08)/16$ , где 13,5720 мм – наружный диаметр резьбы в основной плоскости;  $l_2 = 5,08$  мм – длина от торца трубы до основной плоскости; 1/16 – конусность данной резьбы по рассматриваемому стандарту. Минимальный наружный диаметр – 13,254 мм ( $13,572 - (5,08)/16$ ). Шаг резьбы  $P = 1,4110$  мм и высота профиля резьбы  $H_1 = 1,1288$  мм определены в ГОСТ 6111-52. Размер площадки на наружном диаметре выступа резьбы 0,0558 мм определен в стандарте через фрагмент отрезанного исходного треугольника высотой 0,0330 $P$ . Остальные параметры методики расчета координат точек метчиков [22] для всех затылований, стружечных канавок были приняты равными нулю. Наконец, параметры конусности резьбы были заданы так: конусность по среднему, внутреннему, наружному диаметрам, равным стандартному значению 0,0313 (1/32).

На основе перечисленных исходных данных было получено облако 171836 точек конической дюймовой резьбы, внешний вид которых показан на рис. 1. Рассмотрение координат точек на торцах показало, что данные точки соответствуют расчетным параметрам по ГОСТ 6111-52 (рис. 2).

Расчет расстояния между основной плоскостью и плоскостью торца малого диаметра резьбы по вышеприведенной методике позволил получить множество точек, ограниченное основной плоскостью (рис. 3). Полученное расстояние до основной плоскости оказалось равным 4,78 мм (шаг расчета точек по оси  $Z$  был равен 0,02 мм). Приведенный средний диаметр оказался равным требуемой величине – 12,4429 мм. Наружный диаметр в этой плоскости оказался равным 13,552 мм, тогда как по стандарту он должен быть равен 13,572 мм. Для верификации использованной методики расчета, основанной на разделении точек левой и правой сторон резьбы, произведен вывод этих точек на экран компьютера (рис. 4). По рис. 4 видно, что разделение произошло без взаимного пересечения и потерь точек.

### Результаты и обсуждения

Несмотря на определенное соответствие расчетных значений параметрам, определенным в стандарте, расхождения все же имеются. В частности, стандартом определено, что основная плоскость должна характеризоваться расстоянием 5,08 мм. Отличия расчетной величины составляют абсолютное значение – 0,3 мм, а относительное –  $100(5,08 - 4,78)/5,08 = 5,9\%$ . Такой результат требует своего обоснования, поскольку он показывает, что, возможно, какие-то обстоятельства не были приняты во внимание. Поскольку все результаты расчетов, все точки, полученные по координатам, отражены графически, то представляется целесообразным наглядно оценить

требуемые величины прямо на экране компьютера. Ранее разработанная программа позволяет строить профили резьбы в любом осевом сечении, в частности, в сечении с полярным углом  $320^\circ$ .

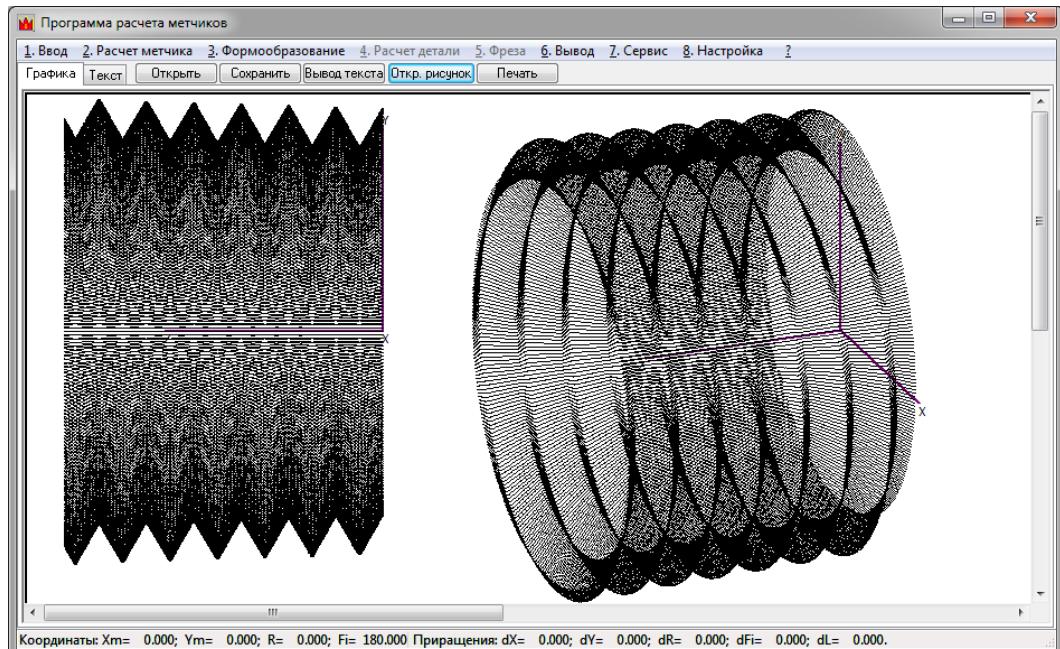


Рис. 1. Облако точек конической резьбы K1/4" ГОСТ 6111-52, полученное на основе авторской методики [22]

Fig. 1. Point cloud of tapered thread K1/4" GOST 6111-52, obtained on the basis of the author's method [22]

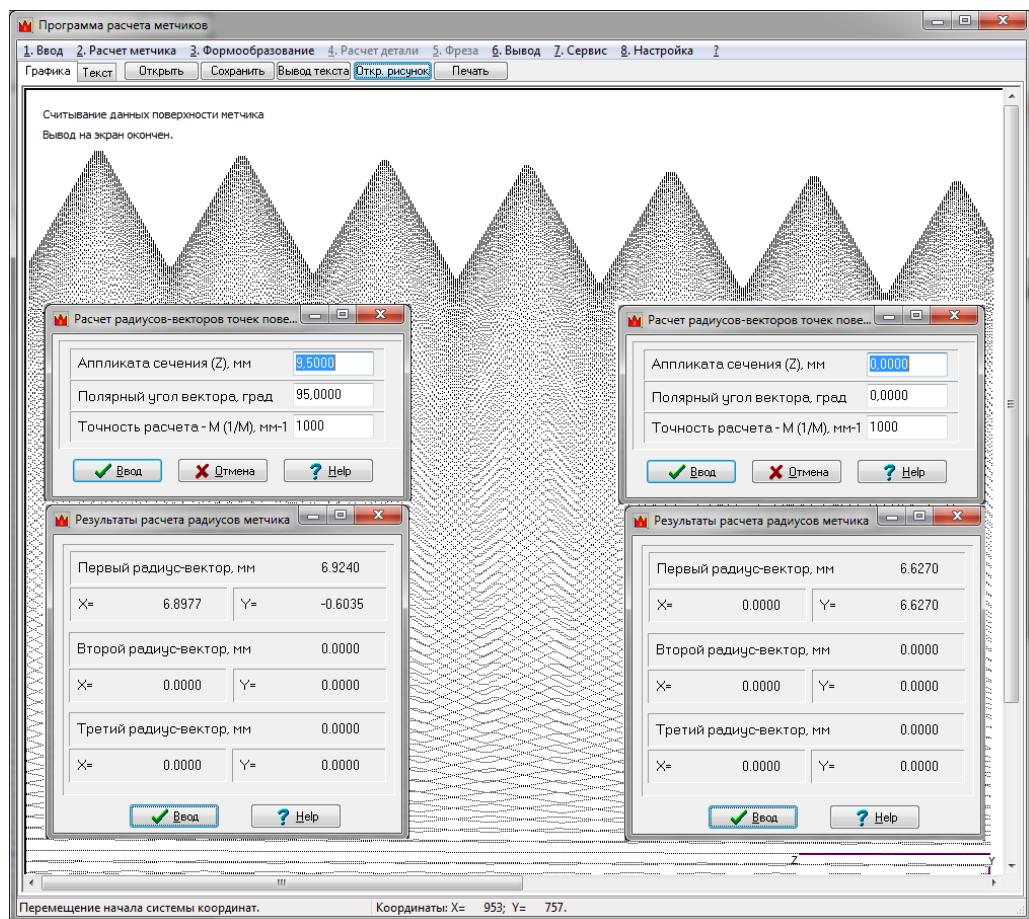


Рис. 2. Расчет максимального и минимального наружных диаметров по авторской методике [22]

Fig. 2. Calculation of maximum and minimum major diameters according to the author's method [22]

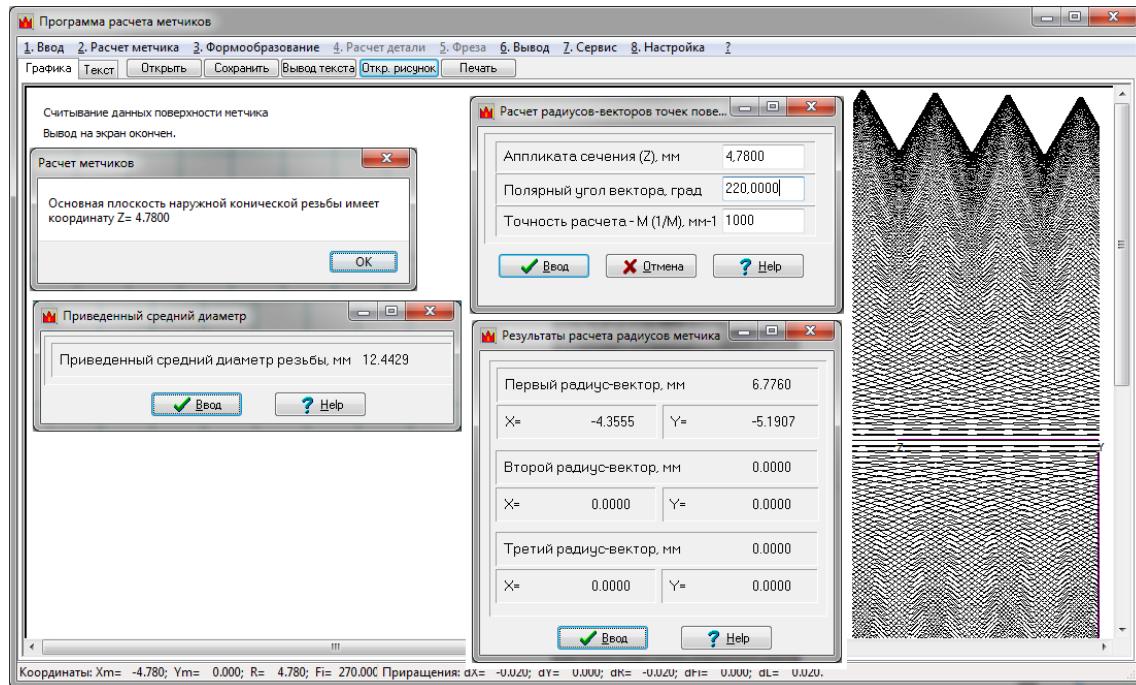


Рис. 3. Множество точек резьбы до основной плоскости; расчет по новой методике  
Fig. 3. Thread point set to handtight engagement plane; calculation using a new method

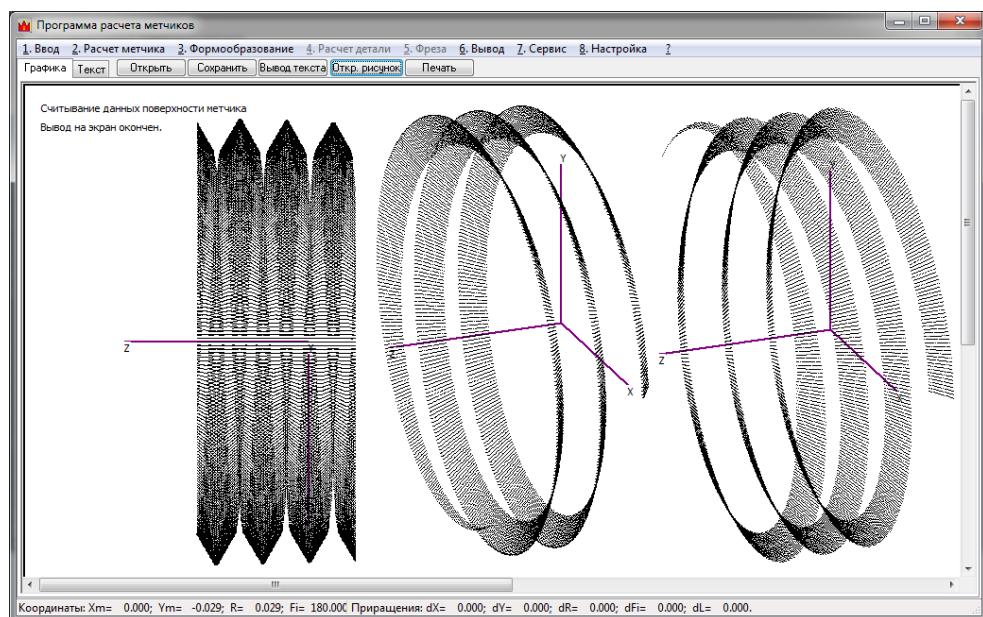


Рис. 4. Множество точек на левой и правой сторонах выступа резьбы (по авторской методике) [22]  
Fig. 4. A set of points on the left and right thread ridge flanks (according to the author's method) [22]

Сравнение таких профилей с проекцией резьбовой поверхности на ту же осевую плоскость показало, что получаемые контуры практически не отличаются. В связи с этим на рис. 5 для наглядности приведена проекция резьбовой проекции на некоторую осевую плоскость, в которой цилиндр со средним диаметром резьбы осекает на выступе этой резьбы отрезок, начинающийся с базовой плоскости (толщина линий увеличена по требованиям издательства).

Измерения по точкам показали, что отрезок на выступе витка около этой плоскости имеет длину, равную 0,71 мм, тогда как прилегающий к нему отрезок во впадине имеет длину, равную 0,74 мм. Увеличение отрезка во впадине резьбы, очевидно, связано с уменьшением ее диаметра

из-за конусности. В случае формирования резьбы на резьбошлифовальном станке такое увеличение будет обусловлено смещением абразивного круга к оси шлифуемой резьбы на следующем ее витке при движении инструмента к меньшему торцу винта. Удвоение длины первого отрезка практически дает требуемую величину шага резьбы 1,411 мм, что показывает адекватность вычислений.

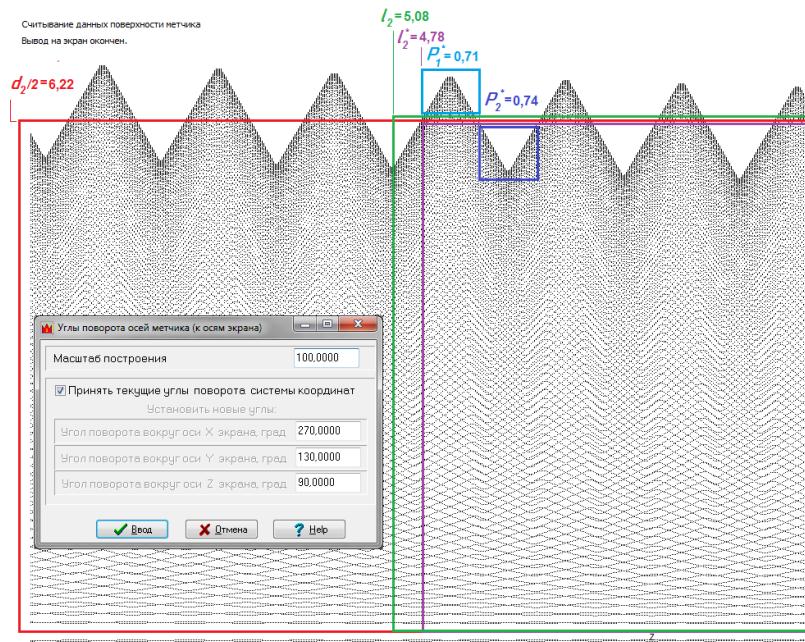


Рис. 5. Схема для расчета длины отрезка на выступе резьбы и на цилиндре диаметром  $d_2$

Fig. 5. Scheme for calculating the length of a line segment on a thread ridge and on a cylinder with a diameter of  $d_2$

Поскольку оснований для признания методики ошибочной не найдено, то было высказано предположение, что одной из причин возможного несоответствия полученных данных требуемому по стандарту значению может быть низкая точность численного расчета. В связи с этим на основе используемой программы было получено облако из 686 262 точек с шагом 0,005 мм (рис. 6). В этом случае выполненный расчет положения основной плоскости позволил получить расстояние, равное 5,01 мм, что в целом соответствует значению из стандарта в 5,08 мм (погрешность 0,2 %). Таким образом, предлагаемая методика расчета была подтверждена. Вместе с тем такое уточняющее дополнительное исследование показало одно важное обстоятельство, которое необходимо учитывать в заводской практике. Требуемая точность такого численного расчета существенно зависит от шага рассчитываемой сетки точек поверхности детали, что устанавливает точность определения координат этих точек. Следовательно, и точность определения координат точек реальной поверхности резьбы будет существенно влиять на точность получаемого результата. Приведенный пример показал, что такая точность измерений должна быть в пределах нескольких микрон. Между тем в ранее приведенных публикациях погрешности измерений ряда оптических КИМ могли на порядок превышать данные величины [13]. Другие системы позволяли получать координаты точек с подобными погрешностями [14, 17]. Таким образом, предлагаемый подход имеет перспективы своего применения, но точность определения координат точек на КИМ должна быть микронной. Поскольку в расчетах использовалось понятие приведенного среднего диаметра для цилиндрических резьб, то такие перспективы также открываются в случае контроля конических резьб при свинчивании их с цилиндрическими резьбами. В этом случае калибр-кольца должны иметь цилиндрическую резьбу, что полностью соответствует предлагаемой методике расчета. В заключение следует отметить важность решения задачи определения положения оси прилегающих винтовых поверхностей к реальной резьбе в системе координат детали. Решение систем уравнений с множеством неизвестных по типу предложенных в ранее цитированной работе [20] представляется достаточно сложной и трудоемкой задачей.

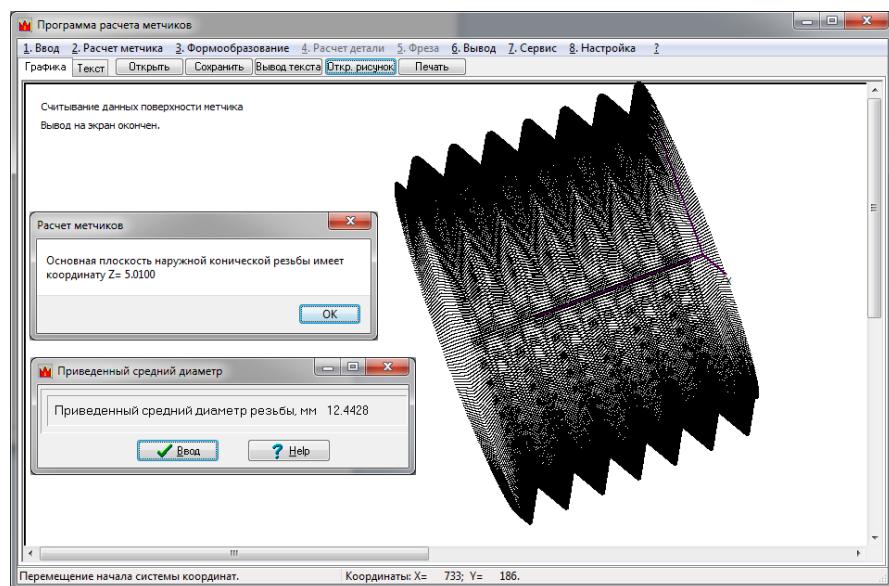


Рис. 6. Облако точек конической резьбы, полученное с шагом 0,005 мм на основе известной методики [22]  
Fig. 6. Point cloud of tapered thread, obtained with step 0,005 mm on the basis of the well-known method [22]

## Выводы

- Предлагаемая методика расчета расстояния от базового торца конической резьбовой поверхности до ее основной плоскости является достаточной для контроля резьб с использованием КИМ.
- Для достижения требуемой точности расчета расстояния от торца до основной плоскости конической резьбы необходимо получать от КИМ координаты облака точек резьбовой поверхности с погрешностями не более чем в несколько микрон.
- Предлагаемая методика является пригодной как для случая свинчивания конической резьбы трубы с конической резьбой муфты, так и для случая свинчивания конической резьбы трубы с цилиндрической резьбой муфты.

## Список литературы

- Мурачёв Д.А., Черепанов М.А. Технология измерения параметров деталей на координатно-измерительной машине GLOBAL CLASSIC 05.05.05 // Техническое регулирование в едином экономическом пространстве: сборник статей IV Всеросс. н-практ. конф. Екатеринбург, 2017. С. 131–140.
- Hexagon. Globals. Data Sheet. Germany: Hexagon Manufacturing Intelligence. 2018. 16 p.
- Quindos. Leitz PMM. Germany: Hexagon Metrology GmbH. 2008. 35 p.
- Advanced screw thread metrology using a holistic approach. Germany: Physikalisch-Technische Bundesanstalt. 2019. 2 p.
- Расширение возможностей систем измерения контура MarSurf XC 20, XCR 20 или XP. Опция измерения резьбы. Germany: Mahr GmbH. 2012. 4 с.
- Yunfeng Z., Zhongming F., Pengpeng L. Contact high-precision large stroke thread measuring instrument// International Journal of Research in Engineering and Science. 2015. Vol. 3 Iss. 6. P. 48–54.
- Laks S.A., Raja J. Bibliography of Screw Thread Measurement. U.S. Department of commerce. 1993. 88 p.
- Traceability of thread measurements. Germany: Physikalisch-Technische Bundesanstalt. 2022. 44 p. DOI: 10.7795/550.20230717.
- Carmignato S., De Chiffre L. A new method for thread calibration on coordinate measuring machines // CIRP Annals. 2003. Vol. 52, Iss. 1. P. 447–450. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60622-2.
- Merkac T.P., Acko B. Comparising measuring methods of pitch diameter of thread gauges and analysis of influences on the measurement results // Measurement. 2010. Vol. 43. P. 421–425. DOI: 10.1016/j.measurement.2009.12.012.

11. Comparison of internal and external threads pitch diameter measurement by using conventional methods and CMM's/ I.A. Yuksel, T.O Kilinc, K.B. Sonmez, S.O. Aktan // 19th Int. Congress of Metrology. Art.N 09001. DOI: 10.1051/metrology/201909001.
12. Носкова Ю.Ю., Халтурин О.А., Абляз Т.Р. Метод контроля конических резьб для элементов бурильных колонн на координатно-измерительной машине // Вестник ПНИПУ, «Машиностроение, Материаловедение». 2012. Т. 14, № 1. С. 85–91.
13. A method of screw thread measurement using a 3D vision system / R. Farana, A. Sioma, P. Suligab, J. Kowal // Journal of Machine Construction and Maintenance. 2018. Vol. 2, Iss. 109. P. 7–14.
14. A new approach for holistic thread profile determination supported by optical focus variation measurements / V. Ullmann, T. Meb, K. Wenzel, T. Machleidt, E. Manske // Engineering for a Changing World: Proceedings; 59th IWK. 2017. Vol. 59, No. 1.1.12.
15. Improved particle swarm optimization algorithm based on a three-dimensional convex hull for fitting a screw thread central axis / L. Lei, Z. Xie, H. Zhu, Y. Guan // IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 4902–4910. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3048376.
16. Axial-Stereo 3-D Optical Metrology for Inner Profile of Pipes Using a Scanning Laser Endoscope / Y. Gong, R.S. Johnston, C.D. Melville, E.J. Seibel // Int. J. Optomechatronics. 2015. Vol. 9, Iss. 3. P. 238–247. DOI: 10.1080/15599612.2015.1059535.
17. Gong Y., Seibel E.J. Three-dimensional measurement of small inner surface profiles using feature-based 3-D panoramic registration // Opt Eng. 2017. Vol. 56, Iss.1:014108. DOI: 10.1111/1.0E.56.1.014108.
18. Suliga P. A feature analysis of a laser triangulation stand used to acquire a3D screw thread image // 17th Int. Carpathian Control Conference (ICCC). Slovakia. 2016. P. 702–705. DOI: 10.1109/CarpathianCC.2016.7501186.
19. Peti F., Serban P. Coordinate Measuring Machine Probes Effect during Inner Thread Position Measurement // Proceedings MDPI. 2020. Vol. 63, Iss. 1:55. DOI: 10.3390/proceedings2020063055.
20. Schadel S., Wedmann A., Stein M. Advanced screw thread metrology using an areal measuring strategy and a holistic evaluation method// Measurement Science and Technology. 2019. Vol. 30. No. 075009. DOI: 10.1088/1361-6501/ab1501.
21. Shchurov I.A. Calculation of the virtual pitch thread diameter using the cloud of points from CMM // Int J Adv Manuf Technol. 2011. Vol. 53. P. 241–245. DOI: 10.1007/s00170-010-2815-z.
22. Щуров И.А. Расчет точности обработки и параметров мерных инструментов на основе дискретного твердотельного моделирования: монография. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ. 2004. 320 с.

### References

1. Murachev D.A., Cherepanov M.A. Technology of measuring the parameters of parts on the coordinate measuring machine GLOBAL CLASSIC 05.05.05. *Technical regulation in a single economic space: collection of articles of the IV All-Russian n-practical conf.* Ekaterinburg, 2017, pp. 131–140. (In Russ.)
2. Hexagon. *Globals. Data Sheet*. Germany: Hexagon Manufacturing Intelligence, 2018. 16 p.
3. Quindos. *Leitz PMM*. Germany: Hexagon Metrology GmbH. 2008. 35 p.
4. *Advanced screw thread metrology using a holistic approach*. Germany: Physikalisch-Technische Bundesanstalt. 2019. 2 p.
5. *Rasshirenie vozmozhnostej sistem izmereniya kontura MarSurf XC 20, XCR 20 ili XP. Opciya izmereniya rez'by* [Expands the capabilities of the MarSurf XC 20, XCR 20 or XP contour measuring systems. Thread measurement option]. Germany: Mahr GmbH, 2012. 4 p.
6. Yunfeng Z., Zhongming F., Pengpeng L. Contact high-precision large stroke thread measuring instrument. *International Journal of Research in Engineering and Science*, 2015, vol. 3, iss. 6, pp. 48–54.
7. Laks S.A., Raja J. *Bibliography of Screw Thread Measurement*. U.S. Department of commerce, 1993. 88 p.
8. *Traceability of thread measurements*. Germany: Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 2022. 44 p. DOI: 10.7795/550.20230717.
9. Carmignato S., De Chiffre L. A new method for thread calibration on coordinate measuring machines. *CIRP Annals*, 2003, vol. 52, iss. 1, pp. 447–450. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60622-2.
10. Merkac T.P., Acko B. Comparising measuring methods of pitch diameter of thread gauges and analysis of influences on the measurement results. *Measurement*. 2010, vol. 43, pp. 421–425. DOI: 10.1016/j.measurement.2009.12.012.

11. Yuksel I.A., Kilinc T.O., Sonmez K.B., Aktan S.O. Comparison of internal and external threads pitch diameter measurement by using conventional methods and CMM's. *19th Int. Congress of Metrology*. Art.N 09001. DOI: 10.1051/metrology/201909001.
12. Noskova Yu.Yu., Khalturin O.A., Ablyaz T.R. Method of testing tapered threads for drill string elements using a coordinate measuring machine. *Vestnik of PNIPU. "Mechanical Engineering, Materials Science"*. 2012, vol.14, no. 1, pp. 85–91. (In Russ.)
13. Farana R., Sioma A., Suligab P., Kowal J. A method of screw thread measurement using a 3D vision system. *Journal of Machine Construction and Maintenance*, 2018, vol. 2, iss. 109, pp. 7–14.
14. Ullmann V., Meb T., Wenzel K., Machleidt T., Manske E. A new approach for holistic thread profile determination supported by optical focus variation measurements. *Engineering for a Changing World: Proceedings*; 59th IWK. 2017, vol. 59, no. 1.1.12.
15. Lei L., Xie Z., Zhu H., Guan Y. Improved particle swarm optimization algorithm based on a three-dimensional convex hull for fitting a screw thread central axis. *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 4902–4910. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3048376.
16. Gong Y., Johnston R.S., Melville C.D., Seibel E.J. Axial-Stereo 3-D Optical Metrology for Inner Profile of Pipes Using a Scanning Laser Endoscope. *Int. J. Optomechatronics*, 2015, vol. 9, Iss 3, pp. 238–247. DOI: 10.1080/15599612.2015.1059535.
17. Gong Y., Seibel E.J. Three-dimensional measurement of small inner surface profiles using feature-based 3-D panoramic registration. *Opt Eng*, 2017, vol. 56, Iss.1:014108. DOI: 10.1111/1.OE.56.1.014108.
18. Suliga P. A feature analysis of a laser triangulation stand used to acquire a3D screw thread image. *17th Int. Carpathian Control Conference (ICCC), Slovakia*. 2016, pp. 702–705, DOI: 10.1109/CarpathianCC.2016.7501186.
19. Peti F., Serban P. Coordinate Measuring Machine Probes Effect during Inner Thread Position Measurement. *Proceedings MDPI*, 2020, vol. 63, iss. 1:55. DOI: 10.3390/proceedings2020063055.
20. Schadel S., Wedmann A., Stein M. Advanced screw thread metrology using an areal measuring strategy and a holistic evaluation method. *Measurement Science and Technology*, 2019, vol. 30, no. 075009. DOI: 10.1088/1361-6501/ab1501.
21. Shchurov I.A. Calculation of the virtual pitch thread diameter using the cloud of points from CMM. *Int J Adv Manuf Technol.*, 2011, vol. 53, pp. 241–245. DOI: 10.1007/s00170-010-2815-z.
22. Shchurov I.A. *Raschet tochnosti obrabotki i parametrov mernykh instrumentov na osnove diskretnogo tverdotel'nogo modelirovaniya* [Calculation of machining accuracy and parameters of tools based on discrete solid modeling]. Chelyabinsk, 2004. 320 p.

### Информация об авторах

**Шчуроў Ігорь Алексеевіч**, д.т.н., перший заступник директора Політехнічного інститута, Індустріальний університет, Челябінск, Россия; shchurovia@susu.ru

**Шаламов Віктор Георгієвич**, д.т.н., професор кафедри технології автоматизованого машинобудування, Індустріальний університет, Челябінск, Россия; shalamovvg@susu.ru

**Морозов Алексей Валентинович**, д.т.н., професор кафедри технології машинобудування, Індустріальний університет ім. А.Г. і Н.Г. Столетових, Владимир, Россия; ntk\_2005@rambler.ru

### Information about the authors

**Igor A. Shchurov**, doctor of science, first deputy director of Engineering and Technology Institute, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; shchurovia@susu.ru

**Viktor G. Shalamov**, doctor of science, professor at automotive machine-building technology, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; shalamovvg@susu.ru

**Alexey V. Morozov**, doctor of science, professor of machine building technology department, Vladimir State University named after A. and N. Stoletovs, Vladimir, Russia; ntk\_2005@rambler.ru

*Статья поступила в редакцию 14.10.2024; принята к публикации 23.10.2024.*

*The article was submitted 14.10.2024; accepted for publication 23.10.2024.*