

На правах рукописи



Москалев Андрей Андреевич

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ
ВЫСОКОТОЧНОГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ
МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ РЕЗЬБОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Специальность 05.11.01 – Приборы и методы измерения по видам измерений
(механические величины)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2017

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии имени Д.И. Менделеева».

Научный руководитель:

доктор технических наук Гоголинский Кирилл Валерьевич.

Официальные оппоненты:

Сясько Владимир Александрович, доктор технических наук, профессор кафедры приборостроения ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет»;

Сурков Игорь Васильевич, кандидат технических наук, доцент, директор ЗАО «Челябинский научно-исследовательский и конструкторский институт средств контроля и измерения в машиностроении».

Ведущая организация:

Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы».

Защита состоится « 29 » января 2018 года в 11:00 часов на заседании диссертационного совета Д 308.004.01 на базе ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» по адресу: 190005, г. Санкт-Петербург, Московский пр., д. 19.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» и на сайте vniim.ru/work-sovet.html.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2017 г.

Отзывы на автореферат просим направлять по адресу: 190005, г. Санкт-Петербург, Московский пр., д. 19.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



Г.П. Телитченко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Метрологическое обеспечение резьбовых соединений – актуальная задача современной метрологии. Резьбовые соединения широко используются во многих отраслях промышленности на протяжении десятилетий (нефте- и газодобывающие отрасли, аэрокосмическая промышленность, судостроение и др.). В зависимости от области применения к таким соединениям предъявляются различные требования по надежности и износостойкости. Интенсивный рост и развитие промышленности повышают требования к надежности резьбовых деталей. Поскольку эксплуатационные характеристики резьбового соединения во многом определяются точностью изготовления геометрических элементов резьбы, возникает задача повышения точности измерений таких элементов, а, следовательно, необходимо вести речь о повышении уровня метрологического обеспечения резьбовых соединений.

В настоящее время в метрологическом обеспечении резьбовых соединений есть ряд существенных проблем законодательного и технического характера. Это связано, главным образом, с тем, что в современной метрологии нет однозначного подхода к классификации резьбовых калибров, как средств измерений, следовательно, нет поверочных схем, отсутствует единообразие во взгляде на пригодность тех или иных калибров для контроля резьб разной точности, нет четких требований к перечню параметров резьбы и способу их выражения, необходимых для наиболее объективной оценки точности изготовления резьбового калибра.

Таким образом, актуальными являются научные исследования, направленные на создание и развитие эталонной базы в области измерений резьбовых калибров, а также выработка единого подхода к порядку применения калибров и передаче единицы длины от резьбовых калибров рабочим резьбам.

Цель работы

Целью данной диссертационной работы является разработка и исследование измерительного комплекса для поверки и калибровки резьбовых калибров (далее – комплекс) с метрологическими характеристиками, удовлетворяющими требованиям современной науки и промышленности, для решения актуальной задачи повышения уровня метрологического обеспечения резьбовых соединений и резьбовых калибров цилиндрической резьбы (в частности, метрической, трубной цилиндрической и трапецеидальной однозаходной). Кроме того, целью работы является установление фактического потенциала комплекса при обеспечении прослеживаемости параметров резьбового соединения к единицам СИ.

Задачи исследования

Для достижения поставленных целей следует решить ряд задач:

- Анализ современных методов и средств измерений геометрических параметров резьбовых соединений с учетом многолетнего опыта ВНИИМ. Анализ измерительных возможностей ведущих зарубежных метрологических центров, таких как METAS (Швейцария), PTB (Германия), NIST (США), MIKES (Финляндия) и др. в области измерений параметров резьбовых калибров с целью определения актуальных требований к точности современных средств измерений в данной области.

- Выбор оптимальной структуры и состава комплекса, исходя из требований к его метрологическим характеристикам, сформулированных по результатам проведенного анализа.

- Разработка порядка передачи единиц параметров резьбовых соединений от комплекса резьбовым калибрам и далее рабочим средствам измерений (далее - СИ) параметров резьбы.

- Теоретическое и экспериментальное исследование метрологических характеристик комплекса, выявление составляющих погрешности измерений основного параметра резьбового калибра - среднего диаметра. Определение

случайной и суммарной погрешностей измерений среднего диаметра и методов передачи единицы среднего диаметра, а также проведение экспериментальных исследований резьбовых калибров для подтверждения расчетных данных.

- Определение возможностей использования комплекса для высокоточных измерений геометрических параметров резьбовых калибров с учетом конструктивных особенностей комплекса, его технических характеристик и условий содержания и применения.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем.

- Предложены, обоснованы и созданы состав и структура нового современного высокоточного измерительного комплекса в области метрологического обеспечения резьбовых соединений с высокоточной установкой для измерения среднего диаметра резьбовых калибров на базе горизонтального длиномера.

- Определены и исследованы основные факторы, формирующие погрешность измерений линейных размеров с использованием комплекса. Предложены, обоснованы и экспериментально реализованы методы их минимизации.

- Предложены и экспериментально подтверждены методы передачи единиц в области измерений параметров резьбовых соединений, позволяющие обеспечить передачу единицы среднего диаметра с доверительными границами суммарной погрешности не более 0,5 мкм.

Практическая ценность работы

Практическая ценность диссертационной работы состоит в следующем.

- Впервые создан измерительный комплекс с перспективой создания на его основе государственного первичного специального эталона для средств измерений параметров резьбовых соединений и разработки государственных поверочных схем в данной области. По результатам исследований комплекса достигнуты величины суммарного среднего квадратического отклонения (СКО)

результатов измерений не более 0,2 мкм; доверительные границы суммарной погрешности $\Delta_{\Sigma}(0,99)$ не превышают $\pm 0,5$ мкм. При этом расширен диапазон измерений диаметров резьбовых калибров, в частности, нижний предел измерений диаметров для калибров-пробок снижен с 10 до 1 мм. Следует отметить, что расширенная неопределенность измерений среднего диаметра резьбовых калибров с использованием комплекса составляет не более 0,5 мкм, что в два раза меньше величины, указанной ВНИИМ в базе данных измерительных возможностей СМС ВРМ по состоянию на ноябрь 2016 г.

- Разработано программное обеспечение Thread Gages Calculation Software (TGCS), предназначенное для автоматической обработки результатов косвенных измерений среднего диаметра цилиндрических резьбовых калибров с использованием созданного комплекса.

- Полученные в ходе работы результаты исследований применяются во ВНИИМ при измерении параметров резьбовых калибров, эталонных плоскопараллельных концевых мер длины, а также эталонных измерительных колец, в частности, в рамках международных сличений: КОOMET 690/RU/16 и CCL-K4.2015.

- Внедренный высокоточный измерительный комплекс позволит существенно расширить измерительные возможности ВНИИМ в области измерений параметров резьбовых калибров с последующей актуализацией двух строк СМС.

- Разработан и введен в действие новый национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р 8.677-2009 «Государственная система обеспечения единства измерений. Калибры резьбовые цилиндрические. Методика поверки».

- Разработана методика калибровки СК 03-251-09/14-Т «Калибры резьбовые» в соответствии со стандартом Системы менеджмента качества ВНИИМ СК 02-31-09.

- Определены пути дальнейшего совершенствования нового высокоточного измерительного комплекса.

Результаты работы внедрены во ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», ООО «Призма», фирме «Trimos S.A.» (Швейцария).

Основные положения и результаты, выносимые на защиту:

- Разработанные состав и структура высокоточного измерительного комплекса в области метрологического обеспечения резьбовых соединений с высокоточной установкой для измерения среднего диаметра резьбовых калибров на базе горизонтального длиномера, в сочетании с комплексом технических и методических решений, в том числе мер по обеспечению защиты от влияния внешних факторов (температура окружающей среды, вибрации, и др.) и автоматизации процесса измерений в целях минимизации субъективных погрешностей, позволяют уменьшить суммарное СКО при измерении среднего диаметра резьбового калибра до $\pm 0,2$ мкм.

- Результаты теоретических и экспериментальных исследований основных источников погрешности измерений с использованием комплекса, включая внешние влияющие факторы, методические и инструментальные погрешности, позволяют создать на его основе государственный первичный специальный эталон, обеспечивающий воспроизведение и передачу единиц с точностями, удовлетворяющими наивысшим требованиям отечественной промышленности и соответствующими лучшим мировым стандартам, в целях построения и развития государственной системы метрологического обеспечения РФ в области измерений геометрических параметров резьбовых соединений.

- Предложенная совокупность средств и методов передачи единиц в области метрологического обеспечения резьбовых соединений, включая реализацию метода трех проволок для измерений среднего диаметра с учетом конструктивных особенностей разработанного комплекса, позволяют обеспечить передачу единицы среднего диаметра резьбового калибра с доверительными границами суммарной погрешности не более 0,5 мкм.

Личный вклад автора

Все выносимые на защиту результаты и положения диссертационной работы получены соискателем лично, либо при его непосредственном участии. Автором разработаны структура и состав высокоточного измерительного комплекса в области метрологического обеспечения резьбовых соединений; разработано программное обеспечение TGCS; разработана методика калибровки СК 03-251-09/14-Т «Калибры резьбовые»; определены требования к схемам прослеживаемости в области метрологического обеспечения резьбовых соединений. Автор непосредственно участвовал в разработке ГОСТ Р 8.677-2009. Доля участия автора в трудах, опубликованных в соавторстве, не менее 70 %.

Апробация работы

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались, обсуждались и были одобрены на:

- III Международном конкурсе «Лучший молодой метролог КОOMET-2009», г. Минск (Белоруссия), 2009 г.
- XXIV Научном симпозиуме с международным участием «Метрология и метрологическое обеспечение 2014», г. Созополь (Болгария), 2014 г.
- Шестой международной научно-технической конференции «Измерения и испытания в судостроении и смежных отраслях» Судометрика-2016, г. Санкт-Петербург, 2016 г.
- Пятом всероссийском конгрессе молодых ученых, г. Санкт-Петербург, 2016 г.
- Семинарах лаборатории метрологического обеспечения специализированных средств измерений геометрических величин, параметров резьбы и средств измерений неразрушающего контроля, а также отдела геометрических измерений ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева».

Публикации

По теме диссертационной работы опубликовано 12 научных работ, в том числе 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка использованной литературы из 55 наименований и 4 приложений. Общий объем работы составляет 149 страниц, включая 58 рисунков и 19 таблиц.

В диссертационной работе изложены и обобщены результаты работы, выполненной в период с 2009 по 2017 гг.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, формулируются ее цели, научная и практическая значимость исследования.

В Первой главе описаны основные этапы формирования метрологического обеспечения резьбовых соединений в России. Отмечен вклад в развитие данной области отечественных специалистов, в частности, таких видных ученых, как А.М. Каган, М.Г. Богуславский, В.М. Бржезинский и др. Приведены краткие теоретические сведения о геометрических параметрах резьбовых соединений и резьбовых калибров. Показано, что наиболее ответственным и наиболее сложным для измерения параметром является средний диаметр резьбы. Проведен обзор методов и средств измерений среднего диаметра от высокоточных средств измерений, используемых на уровне национальных метрологических институтов, в частности, длиномеры горизонтальные и машины координатные измерительные (КИМ), до ручного инструмента. Представлены основные достоинства и недостатки каждого из описанных методов. Показана предпочтительность использования метода трех проволок, как наиболее точного и наиболее полно соответствующего теоретической основе. Составлена диаграмма показателей абсолютной

погрешности различных типов средств измерений среднего диаметра резьбы (рисунок 1).

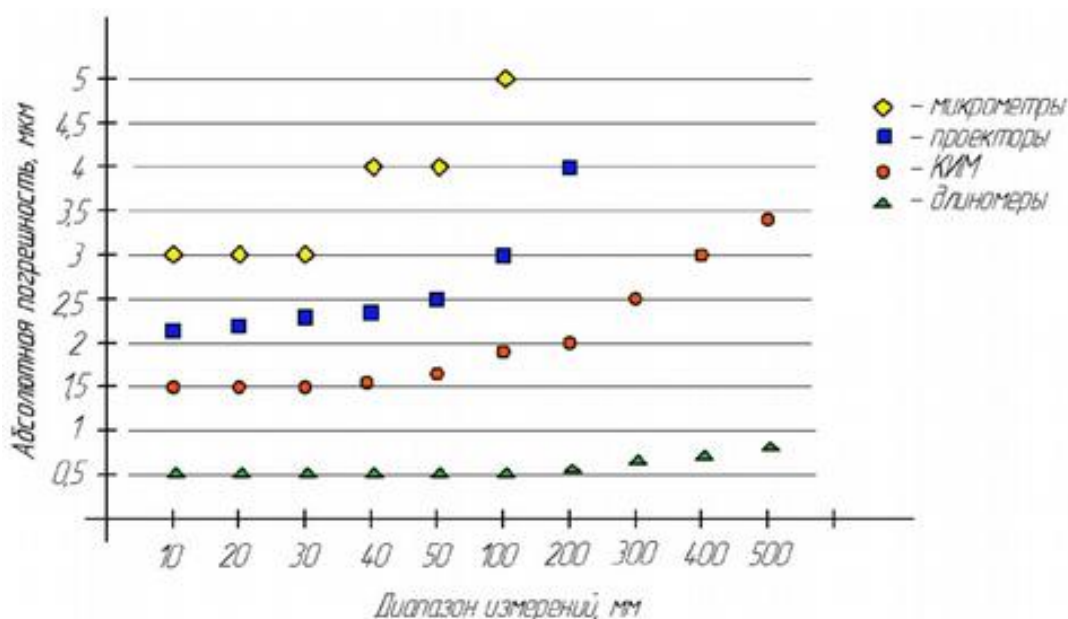


Рисунок 1 - Диаграмма наилучших показателей абсолютной погрешности измерений среднего диаметра резьбовых калибров для различных типов средств измерений

Во **Второй главе** описывается состав высокоточного – превышающего по своим метрологическим характеристикам существующие средства измерений в данной области на порядок – измерительного комплекса для поверки и калибровки резьбовых калибров. Структурная схема комплекса представлена на рисунке 2.

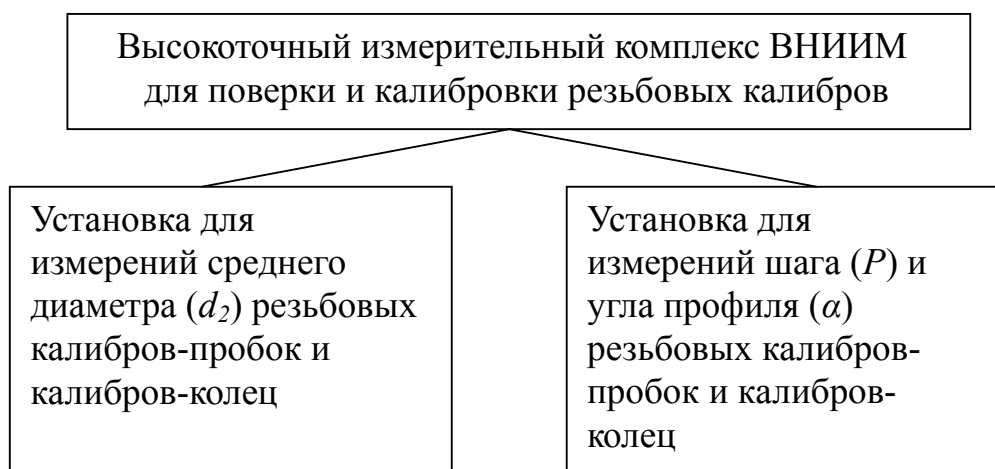
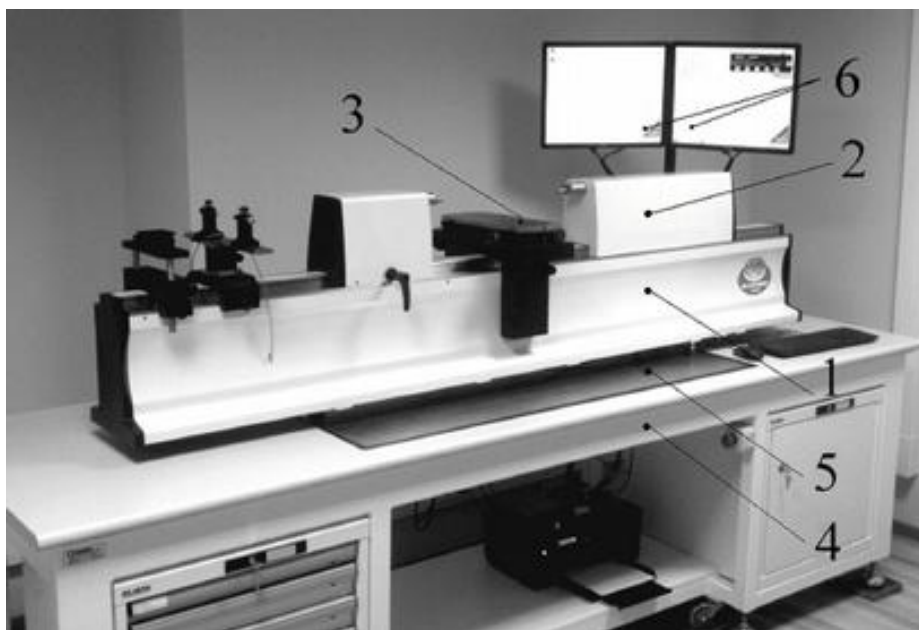


Рисунок 2 – Состав эталонного комплекса в области метрологического обеспечения резьбовых соединений

В качестве основы технической базы комплекса в части измерений среднего диаметра резьбовых калибров было принято решение использовать установку для измерений среднего диаметра (далее – установка). В качестве технической базы установки использован горизонтальный длиномер. Общий вид установки представлен на рисунке 3.

Поскольку область применения использованного длиномера – измерения плоскопараллельных концевых мер длины и гладких цилиндрических мер внутреннего и наружного диаметров, была определена номенклатура дополнительных приспособлений, использование которых совместно с длиномером позволило расширить область применения на резьбовые калибры.



- 1 – станина горизонтального длиномера; 2 – моторизованная измерительная каретка; 3 – измерительный стол; 4 – виброзащитный стол;
5 – пневматическая опора; 6 – дисплей управляющего компьютера

Рисунок 3 – Общий вид разработанной установки для измерений среднего диаметра резьбовых калибров

В главе описываются основные технические решения, реализованные в конструкции установки, и при обеспечении требуемых характеристик. Среди таких решений можно выделить следующие.

1) Для снижения влияния температуры окружающей среды на результаты измерений установка размещена в специально подготовленном помещении, в котором круглосуточно поддерживается температура $(20,0 \pm 0,1) ^\circ\text{C}$, равномерно распределенная по объему.

2) Установка также снабжена системой температурной компенсации, учитывающей в режиме реального времени температуры установки и измеряемого объекта, и вносящей соответствующие поправки в результаты измерений.

3) В целях минимизации влияния внешних вибраций на результаты измерений длиномер из состава установки размещен на специально спроектированном виброзащитном столе со встроенной пневматической системой с обратной связью, позволяющей автоматически регулировать горизонтальное положение длиномера и компенсирующей изменение центра тяжести при перемещении подвижных кареток и измерительного стола.

Установка имеет следующие конструктивные особенности.

1) В целях исключения погрешностей, связанных со сбоем счета, измерительная каретка перемещается только в автоматическом режиме.

2) Для минимизации вклада в результат измерений погрешностей, связанных с человеческим фактором, измерительный стол снабжен электроприводом, управляющим вертикальным и горизонтальным перемещениями, что позволяет с достаточной точностью позиционировать измеряемый объект относительно измерительных наконечников и измерительной оси.

3) В установке применена система автоматического задания и приложения измерительных усилий с дискретностью $0,01 \text{ Н}$, что позволяет исключить погрешность, связанную с различным характером приложения усилий при многократных измерениях.

Описанные особенности позволили получить метрологические характеристики исследуемой установки, удовлетворяющие требованиям к рабочему эталону 1 разряда единицы длины - метра по ГОСТ Р 8.763-2011.

Данные характеристики также подтверждены исследованиями с использованием эталонных плоскопараллельных концевых мер длины, эталонных измерительных колец и Государственного вторичного эталона единицы длины (регистрационный № 2.1.ZZB.0027.2013). В процессе измерений эталонных плоскопараллельных концевых мер длины на установке удалось достичь абсолютной погрешности в пределах $\pm 0,01$ мкм для номинальных длин не выше 100 мм.

В главе также описаны технические и методические возможности измерения среднего диаметра резьбовых калибров с использованием установки, учитывающие описанные выше особенности.

Средний диаметр резьбового калибра с использованием комплекса измеряется по методу трех проволочек. Суть метода состоит в следующем: во впадины резьбы, соответствующие одному витку, с противоположных сторон закладываются гладкие цилиндрические проволочки (рисунок 4), диаметр которых ($d_{\text{п}}$) рассчитывается из условия касания образующих проволочек с профилем резьбы в точках, принадлежащих среднему диаметру. Далее производят измерения общего размера калибра и проволочек M , из которого вычисляется величина среднего диаметра d_2 .

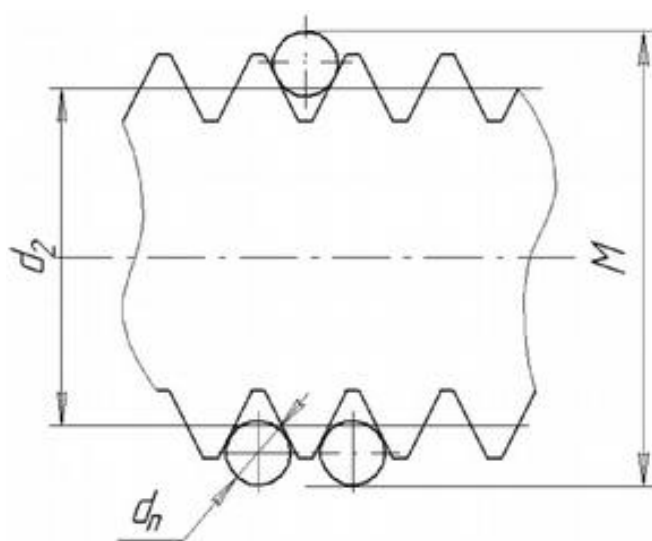


Рисунок 4 – Схема использования метода трех проволочек для измерения среднего диаметра наружной резьбы калибра-пробки

В главе также описаны основные этапы разработки и внедрения программного обеспечения (ПО) TGCS, предназначенного для автоматизации обработки результатов косвенных измерений среднего диаметра резьбовых калибров с использованием комплекса по методу трех проволочек.

Область применения TGCS распространяется на цилиндрические калибры-пробки и калибры-кольца для метрической резьбы по ГОСТ 18465-73, ГОСТ 18466-73, трубной цилиндрической резьбы по ГОСТ 6357-81, ГОСТ 2533-88, трапецеидальной резьбы по ГОСТ 10071-89, ГОСТ 9562-81.

Среди технических особенностей TGCS, обеспечивающих не только решение научно-технической задачи по оптимизации процесса измерений, но и повышение экономической эффективности измерений с использованием комплекса, можно выделить следующие.

Во-первых, программа полностью автономна и не требует дополнительной установки на персональный компьютер каких-либо библиотек. Программа также не привязана к вычислительным приложениям или инструментам, встроенным, например, в разнообразные офисные пакеты.

Во-вторых, математическая часть TGCS предусматривает расчеты с использованием параметров цилиндрических проволочек и T-образных щупов из набора приспособлений, включенных в состав установки. В частности, речь идет о гладких цилиндрических проволочках фирмы «Martin+Tschopp» (Швейцария) и набора щупов TEL75 фирмы «Trimos S.A.». Т.е., в ПО заложен перечень номинальных диаметров проволочек, фактически входящих в состав комплекса, а не просто расчетные значения из соответствующей нормативной документации.

В-третьих, одна из наиболее важных особенностей TGCS – полная совместимость с оригинальным комплексом ПО, под управлением которого осуществляются измерения с использованием установки. Результат косвенных измерений, полученный с помощью установки, передается в диалоговое окно TGCS автоматически и далее преобразуется в искомое значение среднего диаметра резьбового калибра (рисунок 5).

ПО TGCS успешно внедрено во ВНИИМ. В декабре 2016 года программное обеспечение TGCS прошло метрологическое исследование на соответствие ГОСТ Р 8.654-2015, ГОСТ Р 8.883-2015, ГОСТ Р 8.596-2002, МИ 2174-91, Р.50.2.077-2014. По результатам исследования выданы положительное заключение и сертификат соответствия № ПО ИМ-06-2016. ПО внесено в единый реестр российских программ для электронных вычислительных машин и баз данных (приказ Минкомсвязи России № 382 от 21.07.2017 г., регистрационный № 3772).

С практической точки зрения использование TGCS полностью исключает человеческий фактор из процесса обработки результатов измерений и снижает трудоемкость при увеличении степени автоматизации измерений.

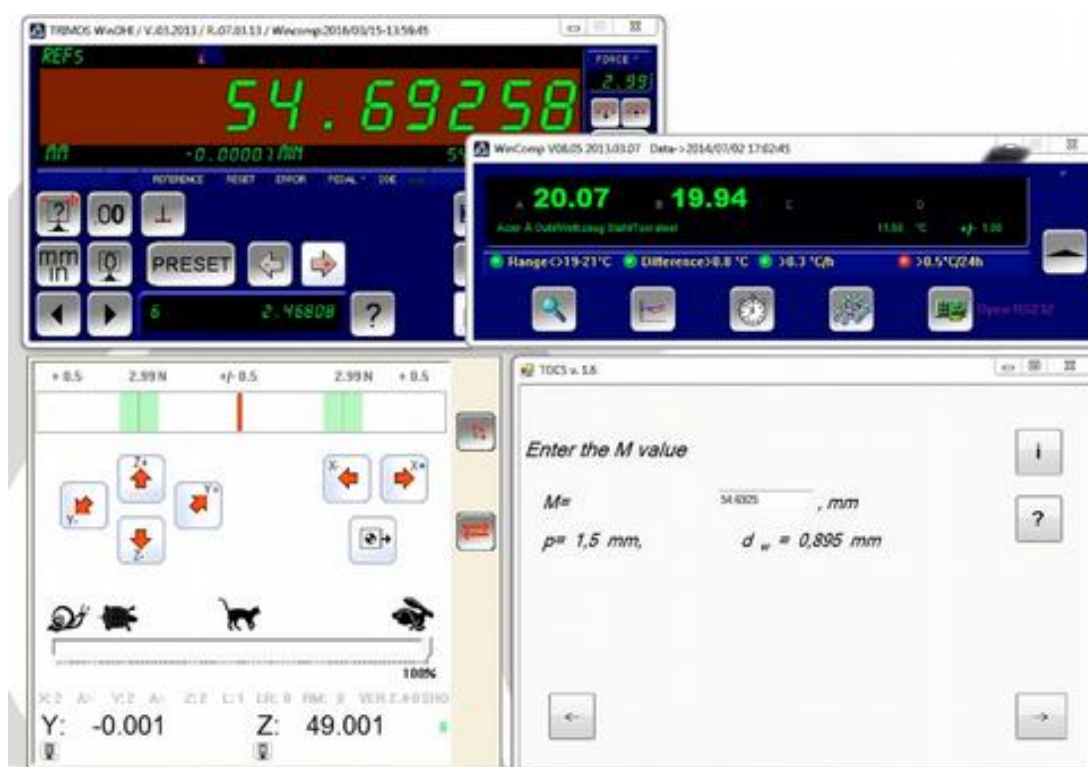


Рисунок 5 – Диалоговое окно TGCS совместно с ПО для управления измерениями и ПО системы температурной компенсации

Кроме того, применение TGCS минимизирует время, затрачиваемое на оценку результата измерений, что позволяет при необходимости производить

серии измерений среднего диаметра, не изменяя измерительную установку. Это, в частности, снижает погрешность измерений, связанную с динамическими характеристиками установки.

В главе также даны рекомендации по дальнейшему совершенствованию ПО TGCS.

Третья глава посвящена исследованию наиболее существенных факторов, влияющих на величину погрешности измерений среднего диаметра резьбовых калибров с использованием установки.

Схема установки в виде основных структурных элементов, поясняющая формирование погрешности измерений, представлена на рисунке 6.

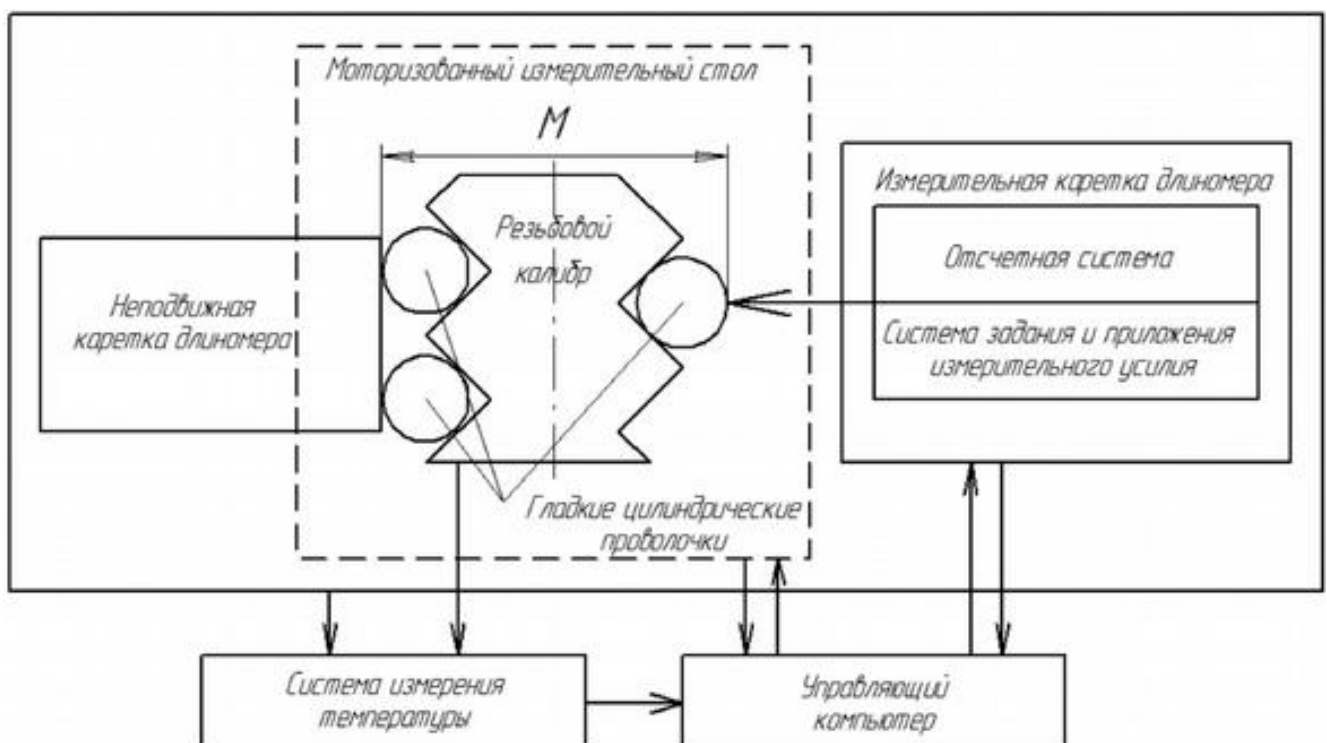


Рисунок 6 – Структурная схема установки для измерений среднего диаметра резьбовых калибров

Составляющие погрешности измерений разделены по признаку зависимости от величины измеряемого диаметра. Составляющие, зависящие от величины диаметра калибра:

- погрешность измерения температуры;
- погрешность измерения температурного коэффициента линейного расширения;
- погрешность совмещения диаметра калибра с осью измерения;
- дрейф нуля;
- инструментальная погрешность установки.

Составляющие погрешности, не зависящие от величины диаметра калибра:

- погрешность отсчета;
- погрешность установки калибра на измерительном столе (неперпендикулярность оси калибра и измерительной оси длиномера), и погрешность установки проволочек и сферических наконечников во впадинах резьбы;
- погрешность, связанная с установкой измерительного усилия;
- погрешность определения диаметра проволочек или расстояния между сферическими наконечниками Т-образного щупа.

В главе приведены результаты теоретических и практических исследований каждой из перечисленных составляющих. Описаны возможности минимизации составляющих погрешности с учетом технических особенностей установки, а также условий ее содержания и эксплуатации. Составляющие неисключенной систематической погрешности (НСП) измерений среднего диаметра калибров-пробок и калибров-колец, полученные по результатам исследований, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Составляющие НСП установки

Составляющие погрешности	Значение погрешности	
	Калибры-пробки	Калибры-кольца
Погрешность определения поправки для приведения полученного среднего диаметра калибра к температуре 20 °С, $\Theta_{C_{tm}}$	$0,23 \cdot D^* \cdot 10^3$ мкм	$0,23 \cdot D \cdot 10^3$ мкм
Погрешность определения поправки на ошибку отсчета, Θ_{C_N}	0,017 мкм	0,017 мкм
Погрешность определения поправки на установку калибра на измерительном столе, Θ_{C_v}	0,14 мкм	–
Погрешность определения поправки на ошибку совмещения диаметра калибра с осью измерения, Θ_{C_a}	–	$0,8 \cdot 10^{-7}$ мм
Погрешность определения поправки на измерительное усилие, Θ_{C_f}	0,14 мкм	0,14 мкм
Погрешность определения поправки на дрейф нуля, Θ_{C_z}	0,1 мкм	0,1 мкм
Инструментальная погрешность установки, Θ_{C_e}	$(0,05+0,5 \cdot D \cdot 10^3)$ мкм	$(0,05+0,5 \cdot D \cdot 10^3)$ мкм
Погрешность определения диаметра проволочек, Θ_{C_w}	0,1 мкм	0,1 мкм

* D – измеряемый диаметр в мм.

Доверительные границы НСП установки при измерении среднего диаметра калибра-пробки $\Theta_{II}(P)$ при доверительной вероятности P будут равны

$$\Theta_{\Pi}(P) = k \cdot \sqrt{\Theta_{C_N}^2 + \Theta_{C_v}^2 + \Theta_{C_f}^2 + \Theta_{C_z}^2 + \Theta_{C_e}^2 + \Theta_{C_w}^2 + \Theta_{C_{tm}}^2}, \quad (1)$$

где k – коэффициент, определяемый выбранной доверительной вероятностью P , числом составляющих НСП и их соотношением. При доверительной вероятности $P=0,99$ $k=1,4$. Следовательно,

$$\Theta_{\Pi}(0,99) = 1,4 \cdot \sqrt{0,29^2 + (0,55 \cdot D \cdot 10^{-3})^2} \text{ мкм}, \quad (2)$$

где D – измеряемый диаметр в мм.

Из таблицы 1 видно, что величина Θ_{Ca} является пренебрежимо малой. Следовательно, доверительные границы НСП установки при измерении среднего диаметра калибра-кольца $\Theta_K(P)$ при доверительной вероятности P будут равны

$$\Theta_K(P) = k \cdot \sqrt{\Theta_{C_N}^2 + \Theta_{C_f}^2 + \Theta_{C_z}^2 + \Theta_{C_e}^2 + \Theta_{C_w}^2 + \Theta_{C_{tm}}^2}, \quad (3)$$

При доверительной вероятности $P=0,99$

$$\Theta_K(0,99) = 1,4 \cdot \sqrt{0,20^2 + (0,55 \cdot D \cdot 10^{-3})^2} \text{ мкм}. \quad (4)$$

СКО НСП установки при измерении среднего диаметра калибров-пробок рассчитывается по формуле

$$S_{\Theta}^{\Pi} = \sqrt{\frac{\Theta_{C_N}^2 + \Theta_{C_v}^2 + \Theta_{C_f}^2 + \Theta_{C_z}^2 + \Theta_{C_e}^2 + \Theta_{C_w}^2 + \Theta_{C_{tm}}^2}{3}}. \quad (5)$$

Следовательно

$$S_{\Theta}^{\Pi} = \sqrt{\frac{0,29^2 + (0,55 \cdot D \cdot 10^{-3})^2}{3}}. \quad (6)$$

Аналогично для калибров-колец:

$$S_{\Theta}^K = \sqrt{\frac{0,20^2 + (0,55 \cdot D \cdot 10^{-3})^2}{3}}. \quad (7)$$

В главе также приведены результаты экспериментальных исследований резьбовых калибров. Погрешность передачи единицы характеризуется указанием СКО результата измерений S_{Σ} , обусловленного влиянием случайных погрешностей и НСП метода и средств измерений. Суммарное СКО результата измерений вычисляется по формуле

$$S_{\Sigma} = \sqrt{S_{\Theta}^2 + S^2}. \quad (8)$$

Случайную погрешность установки можно оценить на основании экспериментальных данных. В диссертационной работе приведены таблицы с результатами экспериментальных исследований калибров-пробок и калибров-колец цилиндрической резьбы для десяти независимых измерений среднего диаметра. Для каждого калибра были вычислены СКО результатов измерений S . После этого для каждого измеряемого калибра были вычислены доверительные границы случайной погрешности результатов измерений $\varepsilon(0,99)$, суммарное СКО результатов измерений S_{Σ} и доверительные границы суммарной погрешности $\Delta_{\Sigma}(P)$. Таблицы с результатами вычислений также приведены в главе. По результатам исследований S_{Σ} не превышает 0,2 мкм, а $\Delta_{\Sigma}(0,99)$ не превышает $\pm 0,5$ мкм.

В Четвертой главе определены требования к иерархическим схемам прослеживаемости единиц в области метрологического обеспечения резьбовых соединений и описаны перспективы разработки государственных поверочных схем для средств измерений параметров резьбы. Поверочной схемы, в рамках которой можно было бы осуществить передачу единиц, соответствующих геометрическим параметрам резьбовых соединений, в настоящее время не существует. Создание во ВНИИМ эталонного комплекса, предназначенного для высокоточных измерений параметров резьбовых калибров, делает в принципе возможным существование поверочных схем с прослеживаемостью единиц к данному комплексу.

Разработка поверочных схем в области метрологического обеспечения резьбовых калибров позволит решить следующие задачи.

Во-первых, будет устранено отсутствие строгого формального соподчинения между контрольными и рабочими калибрами резьбы (в частности, по ГОСТ 18465-73 и ГОСТ 18466-73).

Во-вторых, разработка поверочных схем позволит определиться со статусом большого количества так называемых установочных калибров, входящих, как правило, в комплект поставки трехточечных нутромеров, предназначенных для измерения среднего диаметра резьбы. В настоящее время такие калибры не являются эталонами, но фактически именно от них получают единицу резьбовые нутромеры.

В-третьих, разработка поверочных схем позволит решить вопросы внесения в Государственный реестр специализированных средств измерений параметров резьбовых калибров, таких как измеритель MasterScanner фирмы «IAC Geometrical Engineers» (Нидерланды). Данное СИ предназначено для комплексных измерений геометрических параметров гладких и резьбовых калибров. Следовательно, единицы, соответствующие набору измеряемых параметров, СИ должно получать от эталонных резьбовых калибров согласно поверочной схеме. Таким образом, в настоящее время СИ, позволяющее по своим метрологическим характеристикам осуществлять высокоточные измерения резьбовых калибров, формально не может быть наделено необходимым для этой цели статусом эталона.

Разработка поверочных схем в области метрологического обеспечения резьбовых калибров является одним из этапов внедрения ГОСТ Р 8.677-2009 «ГСИ. Калибры резьбовые цилиндрические. Методика поверки», разработанного на ранних этапах данной работы.

В данной работе предлагается три проекта поверочных схем, область применения которых распространяется на метрическую, трубную цилиндрическую и трапецеидальную резьбы.

Фактически об успешном применении описанных в главе поверочных схем можно говорить, начиная с момента ввода в эксплуатацию в 2013 году установки для измерения среднего диаметра резьбовых калибров. Дальнейшие работы по измерениям параметров резьбовых калибров показали возможность осуществления прослеживаемости геометрических параметров резьбового калибра к созданному в рамках данной работы эталонному комплексу с полученными по результатам исследований пределами допускаемых значений доверительных границ погрешности $\pm 0,5$ мкм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Точность выпускаемых в настоящее время резьбовых соединений ограничена точностью средств и методов измерений геометрических параметров таких соединений. В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача повышения уровня метрологического обеспечения резьбовых соединений, имеющая существенное значение для повышения точности измерений в данной области с единиц до десятых долей микрометра.

На основании комплекса теоретических и экспериментальных исследований получены следующие основные результаты:

1. По результатам анализа многолетнего опыта ВНИИМ и современных измерительных возможностей ведущих зарубежных метрологических институтов, а также на основе данных о текущем состоянии метрологического обеспечения резьбовых соединений в РФ, обоснована необходимость повышения точности измерений резьбовых калибров, разработки и исследования высокоточного эталонного комплекса в данной области.

Исходя из сформулированных по результатам анализа требований, обоснованы структура и состав комплекса, предложены инженерно-технические решения, использованные при его разработке и создании.

2. На основании теоретических и экспериментальных исследований основных составляющих погрешности измерений с использованием установки для измерений среднего диаметра резьбовых калибров показано, что установка

обеспечивает суммарное СКО результатов измерений не более 0,2 мкм и доверительные границы суммарной погрешности не более $\pm 0,5$ мкм. Полученные результаты позволяют улучшить измерительные возможности ВНИИМ в области измерений резьбовых калибров в 2 раза по сравнению с заявленными в базе данных СМС ВІРМ в настоящее время.

3. Определены требования к иерархическим схемам прослеживаемости единиц в области метрологического обеспечения резьбовых соединений, сформулирована научно-практическая значимость разработки и внедрения государственных поверочных схем для средств измерений параметров резьбы. Разработана методика калибровки СК 03-251-09/14-Т «Калибры резьбовые», обеспечивающая передачу единиц в области измерений параметров резьбы от эталонных СИ резьбовым калибрам.

4. Разработан и введен в действие новый национальный стандарт РФ ГОСТ Р 8.677-2009 «Государственная система обеспечения единства измерений. Калибры резьбовые цилиндрические. Методика поверки», регламентирующий перечень и объем операций при подтверждении соответствия резьбовых калибров, как средств измерений, установленным метрологическим требованиям.

5. Разработано программное обеспечение Thread Gages Calculation Software, предназначенное для автоматической обработки результатов косвенных измерений среднего диаметра цилиндрических резьбовых калибров.

6. Результаты работы внедрены во ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», ООО «Призма», фирме «Trimos S.A.», Швейцария.

7. Определены пути дальнейшего совершенствования комплекса.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Абрамова Л.Ю., Москалев А.А., Носова В.А., Помилуйко Я.А., Хавинсон Л.Ф. Метрологическое обеспечение измерений диаметров поршней и цилиндров поршневых систем для эталона единицы давления // Тез. докл. X

Международного научно-технического семинара «Разработка, производство, применение и метрологическое обеспечение средств измерений давления и вакуума». – СПб. – Репрография ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева». – 2006. – С. 82-84.

2. Абрамова Л.Ю., Москалев А.А., Носова В.А., Помилуйко Я.А., Хавинсон Л.Ф. Метрологическое обеспечение измерения диаметров поршней и цилиндров, поршневых систем для эталона единицы давления // Приборы. – 2007. – № 9. – С. 52-55.

3. Москалев А.А. Особенности поверки калибров замковой резьбы // Тез. докл. III международного конкурса «Лучший молодой метролог КОOMET-2009». – БелГИМ. – 2009. – С. 123-128.

4. A. Mosckalev. High-accurate measurements of thread gages using the Labconcept NANO horizontal instrument // 24th National scientific symposium with international participation «Metrology and metrology assurance 2014». Proc. – Sozopol. – 2014. – P. 480-485.

5. Захаренко Ю.Г., Кононова Н.А., Москалев А.А., Фомкина З.В. Возможности «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» в области высокоточных измерений резьбовых соединений // Тез. докл. Пятой всероссийской научно-технической конференции «Измерения и испытания в судостроении и смежных отраслях Судометрика-2014». – Метрологическая ассоциация промышленников и предпринимателей. – 2014. – С. 148-152.

6. Захаренко Ю.Г., Кононова Н.А., Москалев А.А. Метрологическое обеспечение измерений. Резьбовые соединения. // Контроль качества продукции. – 2015. – № 10. – С. 41-45.

7. Захаренко Ю.Г., Кононова Н.А., Москалев А.А. Измерения геометрических параметров резьбовых калибров. // Измерительная техника. – 2016. – № 2. – С. 24-27.

8. Захаренко Ю.Г., Кононова Н.А., Москалев А.А., Аскарлова Э.Ф., Михеев Е.А. Совершенствование эталонной базы в области метрологического обеспечения резьбовых соединений // Научно-технический вестник

информационных технологий, механики и оптики. – 2016. – Т. 16. – № 2. – С. 338–344.

9. Аскарлова Э.Ф., Москалев А.А., Михеев Е.А. Разработка программного обеспечения для оптимизации измерений резьбовых калибров // Тез. докл. V Всероссийского конгресса молодых ученых [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа: http://kmu.ifmo.ru/collections_article/3456/razrabotka_programmnogo_obespecheniya_dlya_optimizacii_izmereniy_rezbovyh_kalibrov.htm, свободный (дата обращения 15.04.2016).

10. Yu. G. Zakharenko, N. A. Kononova, A. A. Moskaev. Measurements of the Geometric Parameters of Thread Gauges // Measurement Techniques. – 2016. – V. 59. – № 2. – P. 137-141.

11. Аскарлова Э.Ф., Брюховецкая Е.Б., Захаренко Ю.Г., Кононова Н.А., Москалев А.А., Михеев Е.А. Разработка и применение программного обеспечения для высокоточных измерений параметров резьбовых калибров // Тез. докл. Шестой международной научно-технической конференции «Измерения и испытания в судостроении и смежных отраслях Судометрика-2016». – СПб: АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». – 2016. – С. 59-62.

12. Аскарлова Э.Ф., Москалев А.А., Михеев Е.А. Разработка программного обеспечения для оптимизации измерений резьбовых калибров // Сборник трудов V Всероссийского конгресса молодых ученых. – СПб.: Университет ИТМО. – 2016. – Т.1. – С. 23-27.