

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ  
«ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ МЕТРОЛОГИИ  
им. Д.И. МЕНДЕЛЕЕВА»**

---

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)**

**ДИССЕРТАЦИЯ**

**на соискание ученой степени кандидата технических наук**

**Научный руководитель:  
доктор технических наук К.В. Гоголинский**

**Санкт-Петербург**

**2017**

## Оглавление

Введение .....	5
Глава 1. Методы и средства измерений параметров резьбы .....	11
1.1 Актуальные проблемы метрологического обеспечения резьбовых соединений .....	11
1.2 Геометрические параметры резьбового соединения .....	18
1.3 Методы измерения среднего диаметра резьбы .....	21
1.3.1 Проекционный метод измерения среднего диаметра .....	23
1.3.2 Измерение среднего диаметра резьбы методом трех проволочек .....	24
1.4 Современные средства измерений среднего диаметра резьбы .....	26
1.4.1 Международный опыт .....	27
1.4.1.1 Горизонтальные длиномеры .....	31
1.4.1.2 Координатные измерительные машины .....	37
1.4.1.3 Проекционные средства измерений .....	43
1.4.1.4 Лазерные измерительные системы .....	46
1.4.1.5 Ручной инструмент .....	48
1.4.2 Отечественные средства измерений .....	49
1.4.2.1 Двухкоординатные измерительные приборы .....	50
1.4.2.2 Прибор для контроля конических резьбовых калибров .....	51
Выводы к главе 1 .....	52
Глава 2. Высокоточный измерительный комплекс ВНИИМ для поверки и калибровки резьбовых калибров .....	54
2.1 Состав высокоточного измерительного комплекса для поверки и калибровки резьбовых калибров .....	54
2.1.1 Установка для измерений шага и угла профиля резьбовых калибров ....	55
2.1.2 Установка для измерений среднего диаметра резьбовых калибров .....	56
2.2 Конструктивные особенности и метрологические характеристики установки для измерений среднего диаметра резьбовых калибров .....	57
2.2.1 Возможности применения установки в области метрологического обеспечения резьбовых соединений .....	61

2.2.2 Особенности измерения среднего диаметра резьбовых калибров на установке ВНИИМ .....	62
2.2.2.1 Измерение среднего диаметра резьбового калибра-пробки .....	63
2.2.2.2 Измерение среднего диаметра резьбового калибра-кольца .....	64
2.3 Разработка и внедрение специализированного программного обеспечения для высокоточных измерений среднего диаметра резьбовых калибров .....	66
2.3.1 Цели и задачи разработки .....	66
2.3.2 Программное обеспечение Thread Gages Calculation Software .....	67
2.3.2.1 Графическая часть ПО .....	67
2.3.2.2 Технические особенности ПО .....	70
2.3.2.3 Опыт применения ПО TGSC во ВНИИМ .....	73
Выводы к главе 2 .....	74
Глава 3. Теоретические и экспериментальные исследования погрешности измерений среднего диаметра резьбовых калибров с помощью высокоточного измерительного комплекса .....	77
3.1 Составляющие погрешности измерений среднего диаметра резьбовых калибров с использованием установки для измерений среднего диаметра ....	77
3.1.1 Погрешность измерений, связанная с температурой окружающей среды и температурным коэффициентом линейного расширения измеряемого калибра .....	80
3.1.1.1 Высокоточная система температурной компенсации .....	81
3.1.2 Погрешность, связанная с ошибкой совмещения диаметра калибра с осью измерения .....	83
3.1.3 Погрешность определения действительного диаметра проволочек .....	89
3.1.4 Погрешность, связанная с неоднозначностью приложения измерительного усилия .....	92
3.1.5 Погрешность, связанная с неточностью установки калибра на измерительном столе .....	95
3.1.6 Погрешность отсчета по измерительной шкале длиномера .....	100

3.1.7 Погрешность, связанная с дрейфом нуля .....	101
3.1.8 Инструментальная погрешность установки .....	104
3.2 Неисключенная систематическая погрешность установки при измерении среднего диаметра резьбовых калибров .....	105
3.3 Результаты экспериментальных исследований резьбовых калибров .....	108
Выводы к главе 3 .....	113
Глава 4. Перспективы создания поверочных схем в области метрологического обеспечения резьбовых соединений .....	114
4.1 Особенности поверочных схем для средств измерений параметров резьбы .....	116
4.2 Применение поверочных схем для средств измерений параметров резьбы во ВНИИМ .....	121
Выводы к главе 4 .....	122
Заключение .....	125
Список использованных источников .....	127
Приложение А. Акты о внедрении .....	132
Приложение Б. Фрагмент исходного кода программного обеспечения TGCS	136
Приложение В. Сертификат соответствия программного обеспечения .....	146
Приложение Г. Приказ о включении сведений о программном обеспечении в единый реестр российских программ для электронных вычислительных машин и баз данных .....	148

## Введение

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**

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 ВІРМ 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: КООМЕТ 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). Акты о внедрении приведены в приложении А.

### **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».

## **Глава 1. Методы и средства измерений параметров резьбы**

### **1.1 Актуальные проблемы метрологического обеспечения резьбовых соединений**

Резьбовые соединения в настоящее время широко используются в совершенно разных сферах человеческой деятельности. Впервые получив техническое признание в XV веке [1], резьба и резьбовые соединения во всем многообразии практических видов реализации проникли в нашу жизнь, занимая, зачастую, полярно противоположные ниши, причем машиностроение здесь далеко не единственная область применения, хотя она и является наиболее очевидной и емкой из них.

Действительно, стоит на минуту задуматься и проанализировать попавшие в поле зрения материальные ценности, чтобы понять, что резьба окружает нас буквально повсюду. При помощи резьбы пробка накручивается на бутылку, лампочка вворачивается в цоколь, батарея соединяется с сетью горячего водоснабжения – перечислять можно достаточно долго. Если вы читаете этот текст на планшетном компьютере, то должны представлять, что разъемные механические соединения корпусных элементов этого прибора реализованы именно в виде резьбы. Если текст перед вами в печатном виде, то вам наверняка будет интересно знать, что в первом печатном станке Гуттенберга были также реализованы резьбовые элементы. Иными словами, резьба интенсивно развивалась, совершенствовалась и распространялась параллельно с общими тенденциями прогресса на протяжении последних столетий, и вполне может быть выделена в самостоятельный раздел технической культуры человеческой цивилизации. При этом до недавнего времени резьба считалась уникальным изобретением человека, однако, в 2011 году аналог резьбового соединения был обнаружен в природе – существует вид насекомых, у которых суставы построены не как шарнир, а как конический винт с ответной частью [2]. До резьбы в

привычном понимании этому соединению, конечно, далеко, но принцип действия именно такой.

Возвращаясь к перечисленным выше частным примерам использования резьбовых соединений, важно отметить, что во всех этих случаях применяемые резьбы абсолютно одинаковы с теоретической точки зрения. Все резьбы имеют общие принципы построения и характеризуются одним набором геометрических параметров, различные вариации которых обусловлены уже конкретной областью применения того или иного соединения и предъявляемыми в соответствии с этой областью требованиями. К примеру, резьба, которая соединяет колпачок авторучки с корпусом, едва ли может претендовать на высокие характеристики по сопротивляемости на разрыв, когда как замковая резьба, соединяющая участки бурильных колонн нефтяной скважины, такими характеристиками как раз должна обладать. Если резьба является частью узла, эксплуатация которого предполагает большое количество циклов сборки-разборки, то резьба здесь должна обладать хорошей сопротивляемостью к износу. Кроме того, если принципиальное значение в этом случае имеет точность взаимного позиционирования соединяемых деталей, то она будет напрямую зависеть от точности изготовления резьбы (соосность внутренней и наружной резьбы, параллельность образующей резьбы оси резьбы и пр.). Если резьбовое соединение работает в экстремальных условиях, например, при регулярных вибрациях, повышенном давлении, в условиях вакуума или под воздействием сложной разнонаправленной нагрузки (например, аэрокосмическая отрасль или нефтедобывающая промышленность), то здесь необходимо говорить о параметрах надежности, герметичности, повышении ресурса резьбового соединения и т.п.

Эксплуатационные характеристики и надежность резьбовых соединений во многом определяются точностью исполнения геометрических элементов резьбы [3, 4]. Говоря о промышленных отраслях, необходимо иметь в виду, что постоянный рост производства, как отечественного, так и общемирового, неотвратимо ведет за собой увеличение интенсивности эксплуатации существующего и вновь создаваемого оборудования, техники, машин и пр.

Следовательно, проблема обеспечения износостойкости резьбовых соединений становится все более актуальной, а повышение ресурса таких элементов имеет не только технический, но и экономический эффект.

Таким образом, говоря об обеспечении или о повышении надежности резьбового соединения, необходимо говорить о повышении требований к точности изготовления элементов резьбы, а значит, возникает вполне логичный вопрос об исследовании и соответствующем контроле таких элементов. Работы в этом направлении впервые были начаты английским инженером Джозефом Уитвортом в 30-е годы XIX века [5, 6]. Именно он первым стал применять в отношении резьбы термины «взаимозаменяемость» и «стандартизация», спроектировал первую измерительную машину, ввел в обращение калибры.

Вклад в развитие данной области измерений внесен и сотрудниками ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» (ВНИИМ). Работы по этой тематике ведутся в институте с разной степенью интенсивности с начала 1930-х годов. Период основного интереса к данному вопросу совпадает с наращиванием промышленного потенциала в рамках стратегии развития народного хозяйства в процессе индустриализации в СССР [7].

Среди специалистов ВНИИМ, так или иначе посвятивших часть своей научной деятельности проблемам измерений параметров резьбовых соединений, такие видные ученые области линейно-угловых измерений, как А.М. Каган, М.Г. Богуславский, В.М. Бржезинский и др. Особо следует отметить работы М.Л. Бржезинского, который, в частности является разработчиком теоретических и практических методов определения важнейшего геометрического параметра резьбы – среднего диаметра – и имеет ряд соответствующих патентов и авторских свидетельств [8].

В качестве главного метрологического центра Советского Союза ВНИИМ также принимал участие в утверждении некоторых нормативных документов в данной области. В частности, методика контроля резьбовых конических калибров МИ 1812-87 [9].

В связи с известными экономическими проблемами в нашей стране, эталонная база ВНИИМ, в том числе и в области измерений параметров резьбы, с конца 1980-х годов обновлялась крайне медленно. В частности, до недавнего времени измерения резьбовых калибров во ВНИИМ осуществлялись с использованием машины координатной измерительной (КИМ) Inspector Midi 185В фирмы «Olivetti SpA», Италия, 1983 года выпуска (рисунок 1.1).

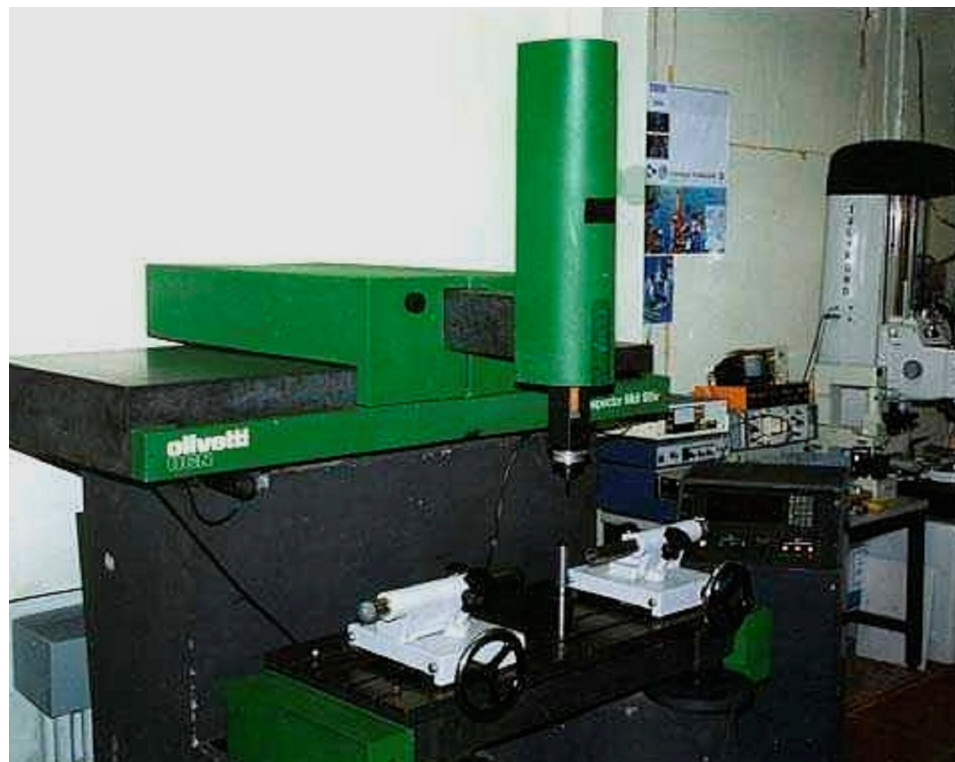


Рисунок 1.1 – Общий вид КИМ Inspector Midi 185В

Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений линейных размеров КИМ составляют  $\pm(2,9+5 \times L)$  мкм, где  $L$  – измеряемая длина в метрах.

Бюджет неопределенности измерений диаметров резьбы с использованием данной КИМ представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Бюджет неопределенности измерений диаметров резьбовых калибров на КИМ ВНИИМ

Входная величина	Источники неопределенности	Значение стандартной неопределенности ( $u$ )	Способ оценивания	Коэффициент влияния ( $c$ )	Вклад в суммарную неопределенность, мкм ( $u_c$ )
$M$	Неопределенность отсчета	$0,1 \cdot 10^{-3}$ мм	A	$\sqrt{2}$	0,14
	Неопределенность наведения на цилиндрическую поверхность	$0,5 \cdot 10^{-3}$ мм	A	$\sqrt{2}$	0,70
	Неопределенность из-за задания измерительного усилия	$0,2 \cdot 10^{-3}$ мм	A	$\sqrt{2}$	0,28
	Неопределенность из-за непараллельности оси измерения и оси перемещения шупа	$0,22 \cdot 10^{-3}$ мм	B	1	0,22
$C_1$	Неопределенность диаметра сферического наконечника шупа	$0,6 \cdot 10^{-3}$ мм	A	1	0,60
$T$	Неопределенность температуры калибра $\Delta t_m$ при величине температурного коэффициента линейного расширения (ТКЛР) $11,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	0,1 °C	B	$\alpha \cdot D$	$1,15 \cdot D \cdot 10^{-3}$
$\alpha$	Неопределенность ТКЛР калибра $\alpha$	$0,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	B	$\Delta t \cdot D$	$0,05 \cdot D \cdot 10^{-3}$
$D$ – диаметр измеряемого калибра в мм.					

Таким образом, суммарная стандартная неопределенность измерений диаметров с использованием КИМ составляет

$$u_c(D) = \sqrt{1 + 1,33 \times D \times 10^{-6}} \text{ мкм.}$$

По своим метрологическим характеристикам КИМ технически устарела около двадцати лет назад, однако, именно на характеристиках этой машины основаны данные об измерительных возможностях ВНИИМ в области измерений параметров резьбы, размещенные в базе СМС ВРМ по состоянию на ноябрь 2016 г.

Как только заходит речь о точности, возникает вопрос о метрологическом обеспечении резьбовых соединений. С теоретической точки зрения в данной области все довольно просто: для контроля резьбы на рабочих деталях применяют резьбовые калибры, по характеру свинчивания которых с рабочей резьбой определяют пригодность последней к применению (порядок такой процедуры описывается, как правило, в нормативных документах на калибры). Резьбовые калибры в свою очередь подвергают поэлементному контролю с помощью различных средств измерений, более высоких по точности.

Несмотря на кажущуюся простоту, в отечественной метрологии до сих пор нет однозначного подхода к классификации резьбовых калибров, как средств измерений. Как ни странно, но резьбовой калибр – мера, несущая информацию о ряде геометрических параметров, имеющих сложную взаимосвязь – формально даже не является средством измерения. А значит, нет поверочных схем, строго регламентирующих порядок передачи единицы длины от калибров рабочим резьбам, нет единообразия во взгляде на пригодность тех или иных калибров для контроля резьб разной точности, нет четких требований к перечню параметров и способу их выражения, необходимых для наиболее полной и объективной оценки точности изготовления резьбового калибра. В то же время, конечным пользователям резьбовых соединений зачастую уже недостаточно иметь на руках в качестве подтверждения пригодности резьбовых калибров только лишь штамп отдела технического контроля в паспорте. На практике это приводит к довольно абсурдным ситуациям, когда заказчики приносят на измерения в институт метрологии конечную продукцию вплоть до мебельных болтов.

Ситуация усугубляется также ввиду того, что метрологические и технические требования к резьбовым калибрам отличаются в разных странах.



Строгого соответствия между российскими и международными нормативными документами в этой области нет, а работы по осуществлению гармонизации стандартов не получили широкого распространения. При этом многие российские промышленные предприятия из-за известных проблем с техническим оснащением на внутреннем рынке были вынуждены закупать резьбовые калибры за рубежом. Вплоть до того, что вся нефтедобывающая отрасль практически перешла на использование резьбовых соединений по американским стандартам API, при том, что номинально в России существует полноценный аналог такому типу резьбы [10]. Таким образом, российское производство ставится в зависимость от иностранных метрологических ресурсов, что недопустимо.

Кроме того, существует ряд предприятий, занимающихся выпуском специфических резьбовых соединений с узкой областью применения, обладающих характеристиками, не подлежащими объективному контролю с помощью резьбовых калибров, изготовленных по существующим стандартам. Такие предприятия вынуждены самостоятельно разрабатывать резьбовые калибры по собственным чертежам, при этом формальный статус таких калибров остается неопределенным.

Все эти случаи красноречиво говорят о необходимости серьезного пересмотра формального подхода к метрологическому обеспечению резьбовых соединений.

Во ВНИИМ с 2001 года ведутся активные работы по созданию системы метрологического обеспечения резьбовых калибров. В рамках этой работы уже создан ряд методик и поверочная схема для калибров замковой резьбы [11]. В данном случае замковые резьбы получили приоритет ввиду резкого повышения технико-экономического интереса к нефтедобывающей отрасли, наблюдающегося в последние годы. Именно здесь находит основное применение данный тип резьбового соединения. В тот же период времени калибры для замковой резьбы производства ЗАО «РиСК» (Москва) были внесены в Государственный реестр средств измерений РФ. На сегодняшний день это единственные в России резьбовые калибры утвержденного типа.

## 1.2 Геометрические параметры резьбового соединения

Существует два подхода в формальном определении резьбы: теоретический и технический. С точки зрения математики речь идет о винтовой линии или спирали, образованной на поверхности прямого цилиндра или прямого конуса [12]. Поверхность резьбы, как технического изделия, образуется при винтовом движении по цилиндрической (конической) поверхности какой-либо геометрической фигуры, своей плоскостью проходящей через ось цилиндра (конуса) [13]. При этом движение таково, что отношение между осевой ( $\gamma$ ) и угловой ( $\varepsilon$ ) составляющими постоянно. Пояснение для случая цилиндрической поверхности диаметром  $d$  дано на рисунке 1.2. Период такого движения соответствует шагу ( $P$ ).

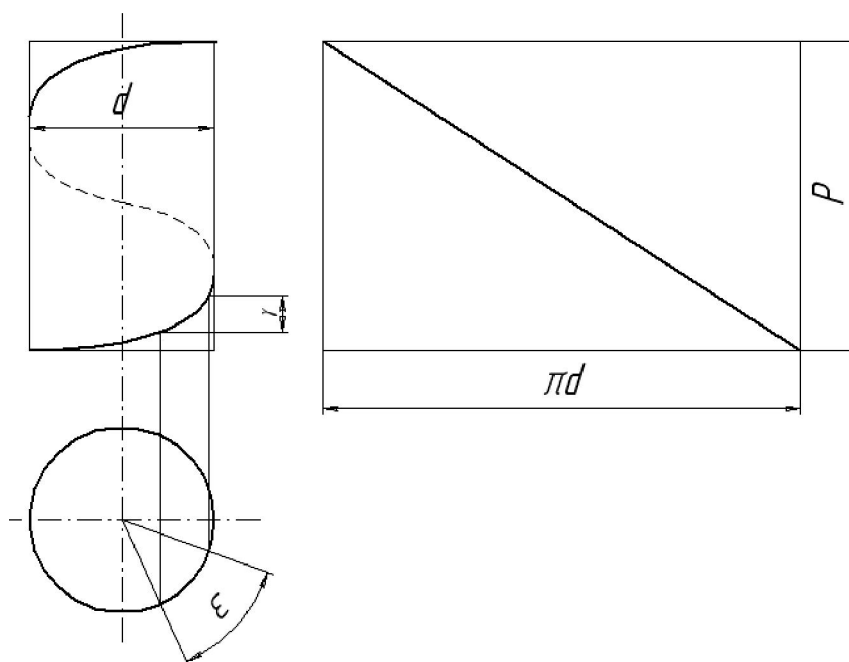


Рисунок 1.2 – Образование винтовой линии на цилиндрической поверхности и развертка цилиндра

Форма геометрической фигуры задает профиль резьбы: треугольный, трапецеидальный, круглый и пр. Направление углового движения делит резьбу на правую и левую. Наружная и внутренняя резьба образуется, соответственно, на наружной и внутренней цилиндрической (конической) поверхностях. Резьба,

образованная на цилиндрической поверхности, называется цилиндрической, на конической поверхности – конической. Винтовых линий может быть несколько, при этом они отстоят друг от друга вдоль оси резьбы на расстояние, кратное шагу. Такая резьба называется многозаходной. В этом случае величина осевого перемещения резьбовой детали увеличивается вдвое (для двухзаходной резьбы) по сравнению с однозаходной резьбой при одинаковом угловом перемещении. Резьба такого типа используется главным образом в ходовых винтах, или узлах, в которых принципиальное значение имеет не надежность соединения, а скорость сборки.

Рассмотрим геометрические параметры резьбового соединения в сечении плоскостью, проходящей через ось резьбы (рисунок 1.3).

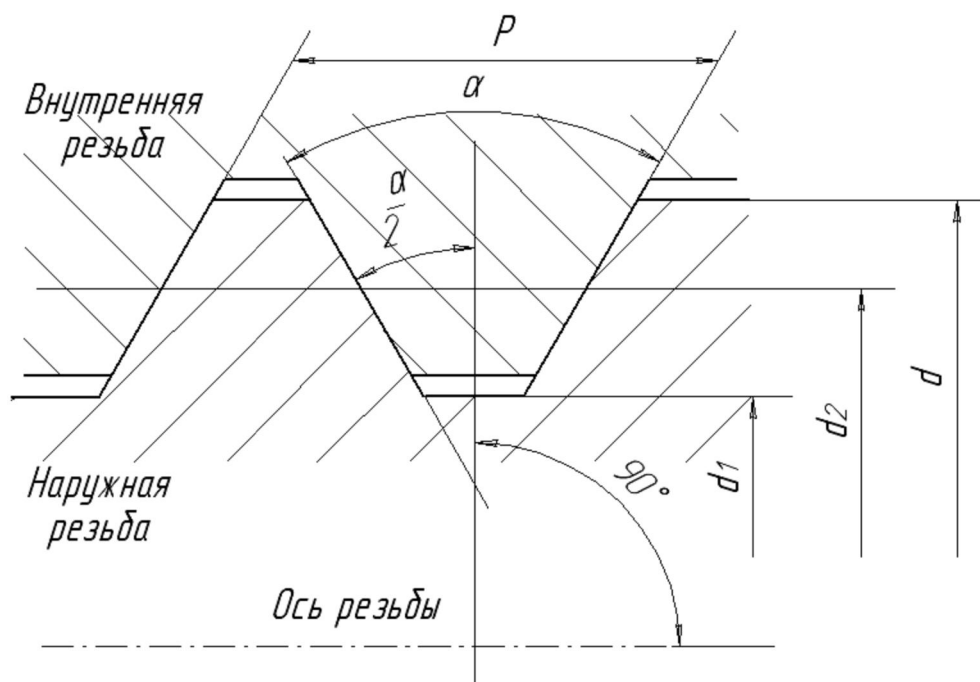


Рисунок 1.3 – Основные геометрические параметры резьбы

Согласно ГОСТ 11708-82, основными параметрами цилиндрической резьбы являются следующие.

Наружный диаметр резьбы ( $d$ ) – диаметр цилиндра, описанного вокруг вершин наружной резьбы или впадин внутренней.

Внутренний диаметр резьбы ( $d_1$ ) – диаметр цилиндра, вписанного во впадины наружной резьбы или в вершины внутренней резьбы.

Средний диаметр резьбы ( $d_2$ ) – диаметр соосного с резьбой цилиндра, образующая которого пересекает профиль резьбы в точках, где ширина канавки равна половине шага резьбы.

Шаг резьбы ( $P$ ) – расстояние между соседними одноименными сторонами профиля в направлении, параллельном оси резьбы.

Угол профиля резьбы ( $\alpha$ ) – угол между боковыми сторонами профиля резьбы. Для резьб с симметричным профилем нормируется величина  $\alpha/2$  – половина угла профиля. Но в общем случае углы наклона правой и левой боковых сторон профиля могут быть не равны. Существуют также резьбы, у которых полный угол профиля наружной резьбы отличается от аналогичного параметра внутренней [14].

На рисунке 1.3 приведен наиболее наглядный случай – цилиндрическая резьба с треугольным профилем. Если речь идет о конических резьбах, то к основным параметрам добавляется угол конуса образующей резьбы ( $\varphi$ ). При этом диаметры резьбы нормируются в так называемой основной плоскости, положение которой устанавливается с привязкой к торцам детали или калибра.

Наиболее важным параметром является средний диаметр [15, 16] – для некоторых типов калибров его размер задается с погрешностью не более  $\pm 3$  мкм. Именно по среднему диаметру происходит сопряжение наружной и внутренней резьбы, однако, диаметр этот соответствует цилиндру, построенному теоретически и проходящему частично в теле калибра, что усложняет процесс измерения. Фактически все методы измерений среднего диаметра являются в разной степени косвенными. Гораздо хуже ситуация обстоит с калибрами конической замковой резьбы: некоторые виды калибров изготавливаются так, что в основной плоскости (в которой задается средний диаметр) вообще отсутствует нарезанная резьба, т.е., величину диаметра здесь можно получить только расчетными методами и никак иначе.

Таким образом, наиболее ответственный параметр калибра является в то же время наиболее сложным для измерения. Поэтому, когда мы говорим об измерении резьбовых калибров, речь идет в первую очередь именно об измерении среднего диаметра.

### 1.3 Методы измерения среднего диаметра резьбы

Прежде всего, стоит разделить понятия контроля параметров резьбы и измерения этих параметров. Как было сказано выше, для контроля резьбовых соединений используют резьбовые калибры. Причем существуют калибры, как для рабочей резьбы, так и для самих резьбовых калибров (так называемые контрольные калибры).

В общем случае для каждого исполнения резьбы существует пара калибров – проходной и непроходной. Проходной калибр должен свободно свинчиваться с резьбой на всей длине, непроходной – только на допускаемое количество оборотов, оговоренное в правилах применения калибров для данного типа резьбы. Проходные калибры являются прототипом резьбовой детали и контролируют комплексно средний диаметр, шаг и угол профиля. Поэтому они имеют полный профиль резьбы и длину, равную длине свинчивания. Непроходной калибр служит для контроля среднего диаметра, поэтому он имеет укороченный профиль и меньшее число полных витков (2,5 – 3) (рисунок 1.4).



Рисунок 1.4 – Пример резьбовых калибров-пробок

Существует заблуждение, что величина среднего диаметра вычисляется, как половина суммы внутреннего и наружного. Т.е., средний диаметр трактуется в соответствии с определением слова «средний». Для болтов и гаек такое

определение в некоторой степени справедливо, но распространять его на калибры ошибочно. Пример – резьбовой непроходной калибр-пробка (рисунок 1.5).

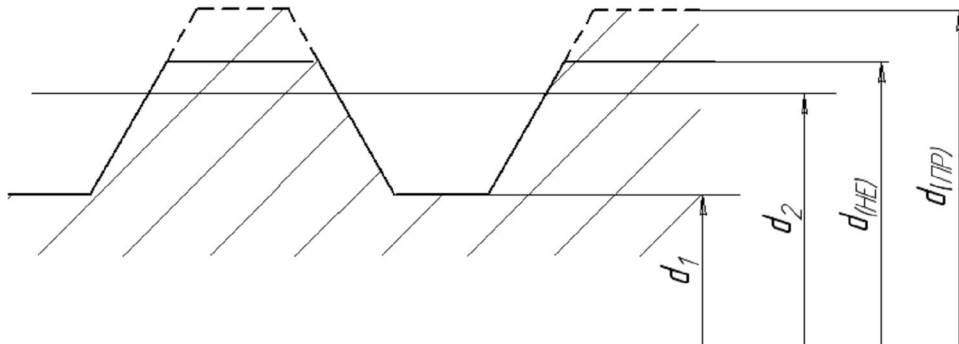


Рисунок 1.5 – Средний диаметр калибра-пробки с полным и неполным профилем резьбы

Штриховой линией обозначен полный профиль резьбового проходного калибра-пробки, сплошной – неполный профиль непроходного калибра-пробки. Как видно из рисунка, величина наружного диаметра ( $d$ ) у непроходного калибра ( $d_{(HE)}$ ) значительно меньше аналогичного параметра проходного ( $d_{(HP)}$ ), при этом положение и, соответственно, величина среднего диаметра  $d_2$  не изменились.

Схема контроля конических соединений показана на рисунке 1.6.

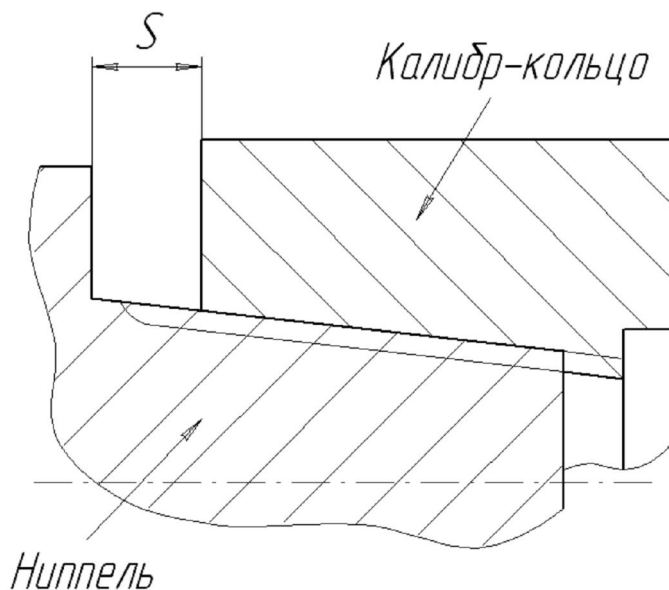


Рисунок 1.6 – Схема образования натяга ( $S$ ) при контроле наружной резьбы замкового ниппеля с использованием калибра-кольца

В случае с коническими резьбами использование проходных и непроходных калибров не имеет смысла. Здесь в качестве показателя пригодности резьбы к применению используют величину натяга, образующегося при свинчивании с резьбовым калибром.

При использовании резьбовых калибров речь идет не столько о контроле резьбовых соединений, сколько об их сортировке на годные и негодные. Например, если проходной калибр не свинчивается с резьбовой деталью, это говорит об общей непригодности детали к применению без выявления конкретного параметра резьбы, значение которого находится вне допускаемых размеров и приводит к отсутствию сопряжения. Результат свинчивания также не служит показателем того, насколько тот или иной параметр резьбы превышает допускаемое значение. Располагая такими данными, можно было бы в частных случаях браковать резьбовые соединения выборочно, если они эксплуатируются в менее ответственных узлах. Естественно, в случае контроля самих резьбовых калибров так называемыми контрольными калибрами, все приведенные выше вопросы являются более актуальными.

Кроме того, ни один калибр не может быть универсальным. По сути, при массовом производстве резьбовых деталей в большом диапазоне номинальных размеров, необходимо на каждый размер иметь пару резьбовых калибров, что не всегда осуществимо на практике. Таким образом, использование специальных средств измерений при исследовании параметров резьбы и резьбовых калибров, является наиболее практичным и информативным.

Рассмотрим два принципиальных метода измерений среднего диаметра резьбы.

### **1.3.1 Проекционный метод измерения среднего диаметра**

Средний диаметр резьбы и резьбовых калибров можно измерить проекционным бесконтактным методом с помощью измерительных проекторов или микроскопов. Линии сетки проекционного экрана последовательно

совмещают с диаметрально противоположными сторонами профиля резьбы (рисунок 1.7). Чтобы избежать погрешности, возникающей вследствие непараллельности оси калибра линии измерения, средний диаметр измеряют по правым и левым сторонам профиля и вычисляют среднее арифметическое значение.

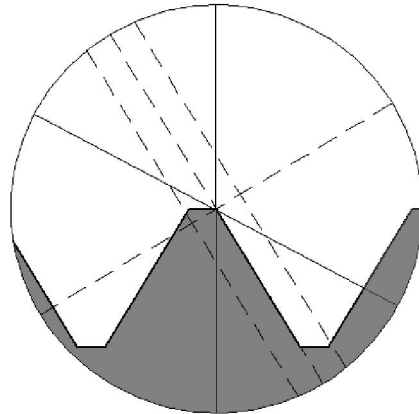


Рисунок 1.7 – Проекционный метод измерения среднего диаметра резьбы

Проекционный метод имеет два существенных недостатка. Во-первых, с помощью такого метода можно измерять только диаметры калибров-пробок. Получить изображение профиля резьбы калибра-кольца в проходящем свете в принципе невозможно. Во-вторых, метод имеет высокую погрешность ( $\pm 2,5$  мкм и выше) ввиду того, что получаемое проекционное изображение профиля резьбы не является изображением осевого сечения. Такое искажение возникает из-за наличия угла подъема резьбы (касательная к винтовой линии резьбы неперпендикулярна оси резьбы) и связанной с этим неоднозначностью фокусировки проектора на контуре профиля.

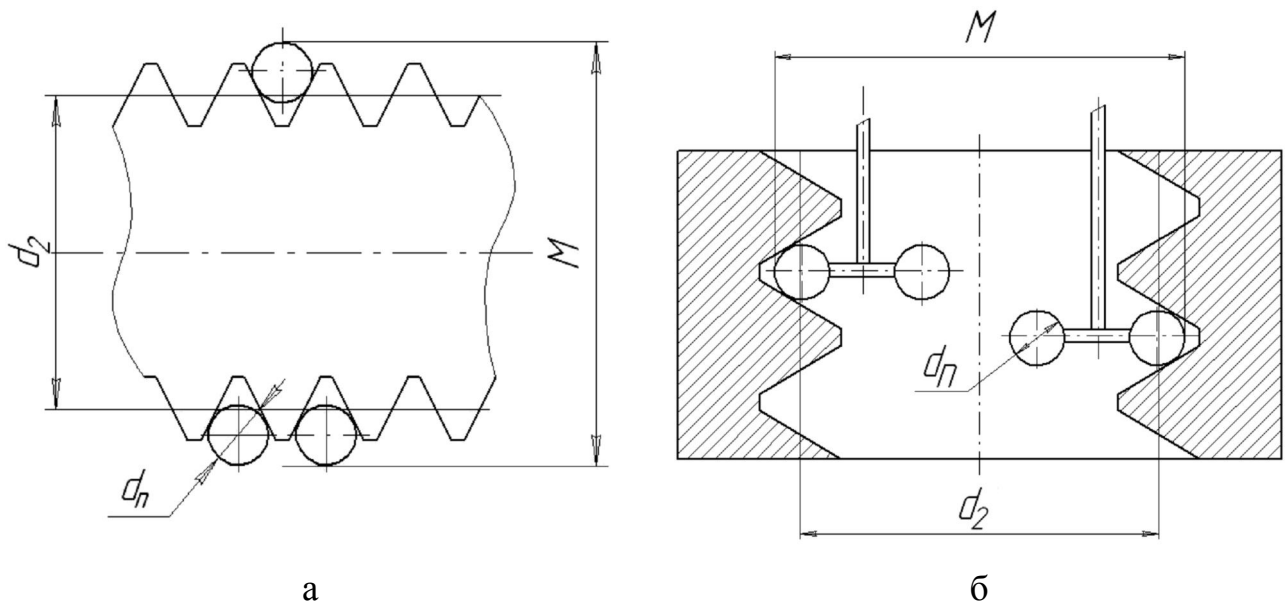
### 1.3.2 Измерение среднего диаметра резьбы методом трех проволочек

Измерение среднего диаметра резьбы с помощью проволочек является наиболее распространенным методом [13].

Теория метода такова: во впадины резьбы, соответствующие одному витку, с противоположных сторон закладываются гладкие цилиндрические проволочки



(рисунок 1.8, а). Их диаметр ( $d_n$ ) рассчитывается из условия касания образующих проволок с профилем резьбы в точках, принадлежащих среднему диаметру. Диаметр самих проволок нормируется (погрешность от  $\pm 0,3$  мкм). Далее производят измерения размера  $M$ , из которого величина среднего диаметра  $d_2$  находится математически [13, 15, 17, 18, 19].



а – наружная резьба (калибр-пробка), б – внутренняя резьба (калибр-кольцо)

Рисунок 1.8 – Метод трех проволок

В случае измерения среднего диаметра внутренней резьбы цилиндрические проволочки заменяются сферическими наконечниками щупа длиномера или КИМ. При этом теоретическое обоснование метода остается аналогичным (рисунок 1.8, б).

Основным недостатком метода является то, что в общем случае при расчете среднего диаметра необходимо учитывать ряд поправок. Среди них в частности, поправка на диаметры используемых проволок, связанная с тем, что действительные значения диаметров могут отличаться от номинального.

В некоторых случаях для измерения среднего диаметра резьбы используют две или одну проволочку. Измерения с двумя проволочками (рисунок 1.9, а) выполняют при малой длине резьбы, что встречается, например, у непроходных

резьбовых калибров. Основной недостаток такой схемы – неточность установки оси резьбы относительно линии измерения.

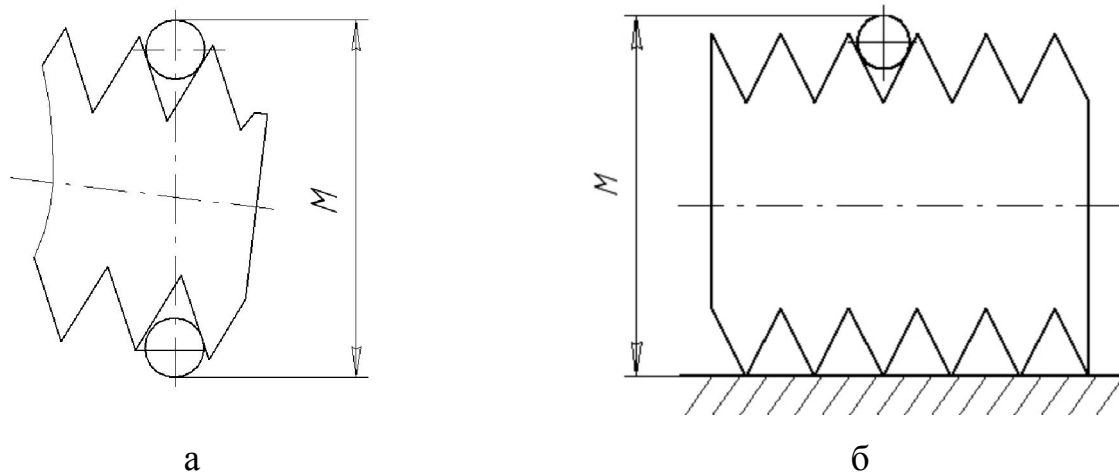


Рисунок 1.9 – Измерение среднего диаметра резьбы с помощью двух (а) и одной (б) проволочек

Измерения с помощью одной проволочки являются наименее точными, так как при расчете среднего диаметра происходит привязка к наружному диаметру резьбы (рисунок 1.9, б), а он изготавливается на порядок грубее среднего. Поэтому измерения с использованием одной проволочки проводят, в основном, для резьб с номинальным диаметром более 100 мм.

#### 1.4 Современные средства измерений среднего диаметра резьбы

Несмотря на существование большого количества различных по принципу действия средств измерений среднего диаметра резьбы, все они, так или иначе, реализуют один из описанных выше методов – либо проекционный, либо метод трех проволочек.

### 1.4.1 Международный опыт

В области высокоточных измерений резьбовых калибров традиционным методом измерений является метод трех проволок, а традиционными средствами – КИМ и горизонтальные длиномеры. Именно такие СИ используются национальными метрологическими институтами (НМИ). В таблице 1.2 приведены сводные данные о средствах измерений геометрических параметров резьбовых калибров в различных зарубежных НМИ [20, 21].

Таблица составлена по информации об измерительных возможностях метрологических лабораторий из базы данных VIPM. Как можно заметить, список институтов и стран, в СМС данных которых отражены резьбовые калибры, достаточно мал. Это, очевидно, говорит не об отсутствии измерительных возможностей, а в целом о взгляде на проблему. К примеру, в данный список не попала Великобритания. В базе данных VIPM лаборатория NPL заявляет только о возможности измерений шага резьбы – как было сказано выше, это не самый ответственный параметр. Однако, вряд ли кто-то может усомниться в возможностях NPL в области измерений резьбовых калибров. Скажем больше: данная лаборатория практически ежегодно выпускает и свободно распространяет обширное руководство по теории и практике измерений параметров резьбы.

Отсутствуют и крупные международные сличения по данному направлению. Единственная существующая в настоящее время тема по сличениям резьбовых калибров действует с 2012 г. в рамках EURAMET и охватывает национальные метрологические лаборатории десяти стран-участниц: Хорватия (пилот-лаборатория), Словения, Австрия, Венгрия, Швейцария, Финляндия, Эстония, Италия, Турция, Франция. Отчет по данным сличениям был опубликован только в 2015 г. Отметим, что среди общих тезисов отчета авторами выделено два принципиальных момента: во-первых, факт существования в современной метрологии проблематики в области измерений среднего диаметра резьбы, и, во-вторых, низкий уровень практических наработок в данной области, а также отсутствие серьезного международного взаимодействия.

Таблица 1.2 - Возможности ведущих НМИ в области измерений параметров резьбовых калибров

Национальный метрологический институт (страна), дата актуализации базы	Измеряемые параметры резьбы	Средства измерений среднего диаметра	Диапазон измерений среднего диаметра, мм (пробки / кольца)	Расширенная неопределенность, мкм ( $U$ ) (пробки / кольца)
РТВ (Германия), январь 2017	$d_2, P, \alpha, \varphi$	КИМ (Leitz PMM 866, Leitz Infinity 12.10.7)	(5-700) / (5-600)	2
METAS (Швейцария), ноябрь 2015	$d_2, P, \alpha$	Горизонтальный длиномер	(2-100) / (4-100)	1,8
NIST (США), июнь 2011	$d_2$	КИМ (Leitz PMM 866)	(1-500)	1,25
China NIM (Китай), сентябрь 2015	$d_2, P, \alpha, \varphi$	КИМ (MasterScanner)	(1-50) / (2,5-60)	3
MIRS (Словения), январь 2016	$d_2, P$	КИМ (SIP CMM5)	(1-300) / (6-300)	Q [2,5; 4,5L], L – в метрах
НМИ (Хорватия), сентябрь 2016	$d_2$	Длиномер (Octagone LMM 300, DMS 680)	(1-60) / (4-60)	3
СМИ (Чехия), сентябрь 2016	$d_2, P$	Длиномер (SIP 1002M)	(0,75-6)	3
SP (Швеция), август 2011	$d_2$	Длиномер	(1,5-75) / (3-70)	2,5 / 3,5
MIKES (Финляндия), январь 2016	$d_2, P, \alpha$	Длиномер (SIP 550), КИМ (Mitutoyo Legex 9106)	(3-150)	2
UME (Турция), сентябрь 2016	$d_2, P$	Длиномер (Mahr 828CiM)	(3-70)	2 / 2,5
		КИМ (PRISMO Zeiss)	(5-700) / (5-600)	3
VNIM (Российская Федерация), ноябрь 2016	$d_2$	КИМ (Olivetti 185B)	(10-500)	Q [1; $8 \times 10^{-3}L$ ], L – в миллиметрах

В таблице 1.3 дан перечень калибров, участвовавших в указанных сличениях [22].

Таблица 1.3 – Перечень артефактов сличений EURAMET L-S21

Тип калибра	Обозначение калибра
Калибр-пробка резьбовой проходной	M6×1, 6H
	M12×1,75, 6H
	M36×1,5, 6H
Калибр-кольцо резьбовой проходной	M18×2,5, 6g
	M30×1,5, 6g
	M42×4,5, 6g

Как видно из представленной таблицы, исследования охватывают только один вид цилиндрической резьбы (метрическая резьба), одно исполнение калибров (только проходные калибры), малое количество номинальных шагов (менее четверти от стандартного ряда), и узкий диапазон номинальных диаметров – от половины до трети диапазона, заявленного участниками в базе данных СМС (таблица 1.2). Таким образом, данные сличения нельзя считать полностью репрезентативными, что в очередной раз говорит о необходимости более крупных и серьезных научных работ в данной области.

Основные результаты указанных сличений приведены в таблице 1.4.

Перечень средств измерений среднего диаметра резьбовых калибров, задействованных в сличениях, приведен в таблице 1.5. Во всех случаях использовался контактный метод трех проволок с незначительными интерпретациями в зависимости от конструкции применяемого средства измерений.

Таблица 1.4 – Результаты измерений среднего диаметра резьбовых калибров лабораториями-участниками сличений EURAMET L-S.21

НМИ, страна	Стандартная неопределенность измерений (k=1), мкм					
	Калибры-пробки			Калибры-кольца		
	M6×1	M12×1,75	M36×1,5	M18×2,5	M30×1,5	M42×4,5
НМИ, Хорватия	1,18	1,26	1,15	1,03	0,90	0,91
MIRS, Словения	1,5	1,5	1,5	1,47	1,47	1,47
BEV, Австрия	2,5	2,4	2,3	1,8	2,4	2,1
МКЕН, Венгрия	1,65	1,70	1,75	1,70	1,80	1,95
METAS, Швейцария	0,55	0,54	0,55	0,80	0,80	0,70
MIKES, Финляндия	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Metrocert, Эстония	0,68	0,66	0,68	0,85	0,77	0,94
INRIM, Италия	1,1	1,4	1,1	0,9	1,1	0,9
UME, Турция	1,01	1,11	1,00	1,10	1,10	1,10
LNE, Франция	0,3	0,3	0,3	0,8	0,7	0,8

Таблица 1.5 – Средства измерений среднего диаметра резьбовых калибров, применяемые странами-участницами в рамках сличений EURAMET L-S.21

НМИ, страна	Сведения о СИ среднего диаметра резьбовых калибров	
	Калибры-пробки	Калибры-кольца
НМИ, Хорватия	Горизонтальный длиномер Zeiss DMS680	
MIRS, Словения	Цифровой микрометр	КИМ SIP CMM5
BEV, Австрия	Горизонтальный длиномер SIP 3002M с лазерным интерферометром	
МКЕН, Венгрия	Горизонтальный длиномер SIP 550M	
METAS, Швейцария	Горизонтальный длиномер SIP 3002M с лазерным интерферометром	Машина для измерений длины SIP LMM5 с лазерным интерферометром
MIKES, Финляндия	Горизонтальный длиномер SIP 550	
Metroser, Эстония	Горизонтальный длиномер ULM Opal 600	
INRIM, Италия	КИМ Moore	КИМ Moore и Tesa
UME, Турция	Горизонтальный длиномер Mahr	
LNE, Франция	Горизонтальный длиномер SIP 550 с лазерным интерферометром	Горизонтальный длиномер SIP 214 с лазерным интерферометром

Рассмотрим основные типы высокоточных средств измерений среднего диаметра резьбовых калибров на примере представленных в таблице 1.5.

#### 1.4.1.1 Горизонтальные длиномеры

По характеристикам точности горизонтальные длиномеры превосходят все средства измерений, применяемые в области резьбовых соединений. Во-первых, это связано с точностью, собственно, самих длиномеров в сравнении, например, с КИМ. Во-вторых, измерение среднего диаметра резьбового калибра здесь

происходит в наиболее точном соответствии с теоретической схемой метода трех проволок. Это продемонстрировано на рисунке 1.10.

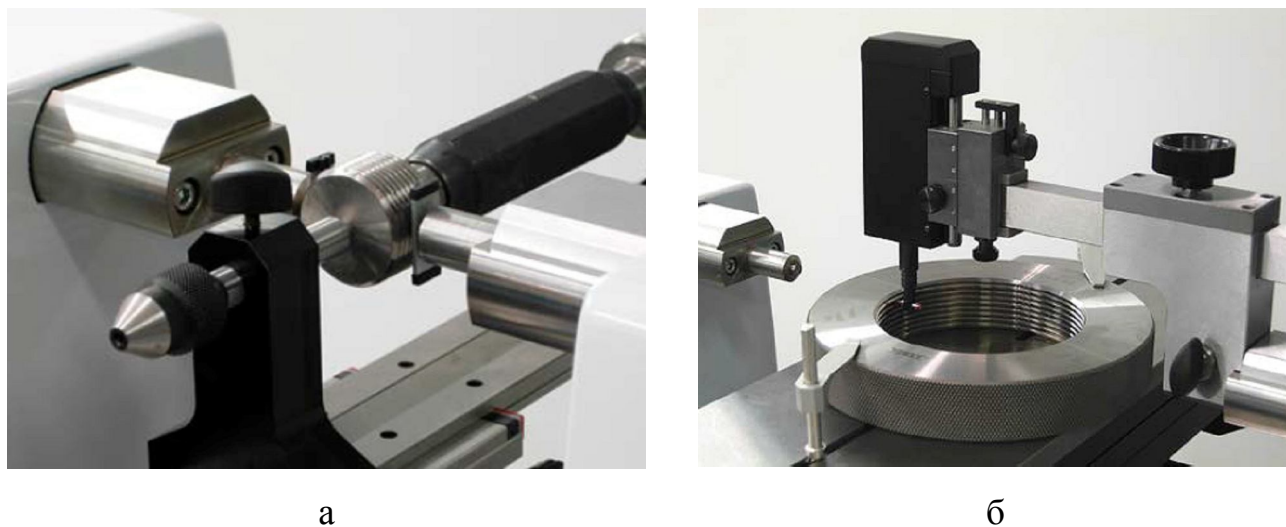


Рисунок 1.10 – Измерение среднего диаметра резьбового калибра-пробки (а) и резьбового калибра-кольца (б) на горизонтальном длиномере

Величина расширенной неопределенности измерений среднего диаметра, как правило, порядка 1 мкм. Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений линейных размеров порядка  $\pm(0,2-1,0)$  мкм. Длинномеры также позволяют производить измерения среднего диаметра резьбовых калибров-пробок и калибров-колец в относительно широком диапазоне с сохранением высокой точности (таблица 1.2).

Остановимся подробнее на специализированной измерительной машине, разработанной НМИ Швейцарии METAS.

Общий вид машины приведен на рисунке 1.11.

Машина специально разработана фирмой «SIP» на базе КИМ CMM5 при участии METAS и предназначена для высокоточных измерений длины, в частности, диаметров измерительных пробок и колец, а также среднего диаметра резьбовых калибров [23].





Рисунок 1.11 – Машина для измерений длины SIP LMM5, METAS, Швейцария

Формально СИ относится к горизонтальным длиномерам, но конструктивно является координатной машиной, особенность которой состоит в том, что на патроне машины установлен подвижный отражатель лазерного интерферометра (рисунок 1.12). Принципиальная схема введения интерферометра в состав машины изображена на рисунке 1.13.



Рисунок 1.12 – Патрон машины SIP LMM5 с контактным измерительным щупом

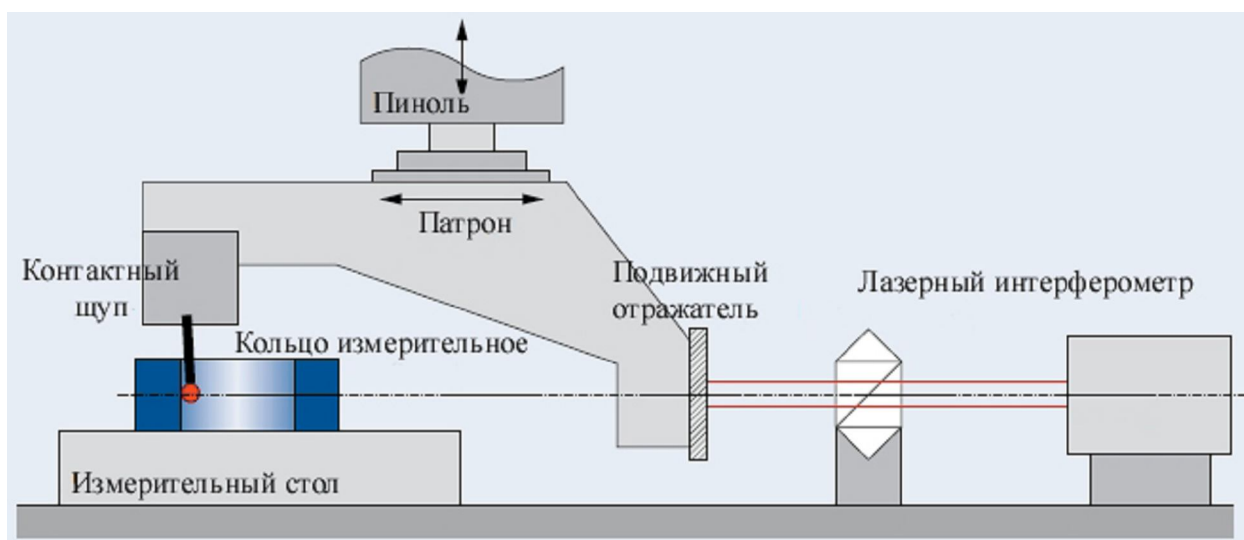


Рисунок 1.13 – Принципиальная схема использования лазерного интерферометра в машине SIP LMM5

Неопределенность измерений различных объектов с использованием данной машины приведена в таблице 1.6.

Таблица 1.6 – Расширенная неопределенность измерений линейных размеров с использованием машины SIP LMM5

Измеряемый объект	Расширенная неопределенность измерений ( $k=2$ )
Измерительные кольца (1-160) мм	$\sqrt{63^2 + (0,28 \cdot 10^{-6} \cdot L^*)^2}$ нм
Измерительные кольца (160-350) мм	$\sqrt{67^2 + (0,62 \cdot 10^{-6} \cdot L)^2}$ нм
Штриховые меры (1-600) мм	$200 + 2 \cdot 10^{-6} \cdot L$ нм
Ступенчатые меры (0-1000) мм	$\sqrt{170^2 + (0,64 \cdot 10^{-6} \cdot L)^2}$ нм
Калибры-кольца цилиндрической резьбы (3-100) мм	1,8 мкм

\*  $L$  – измеряемая длина, мм.

Использование интерферометра в подобных СИ накладывает ограничения по условиям эксплуатации, тем не менее, такая конструкция достаточно

распространена. В частности, существуют длиномеры серийного производства, в которых измерительная каретка выполнена в моноблоке с подвижным отражателем интерферометра (рисунок 1.14).

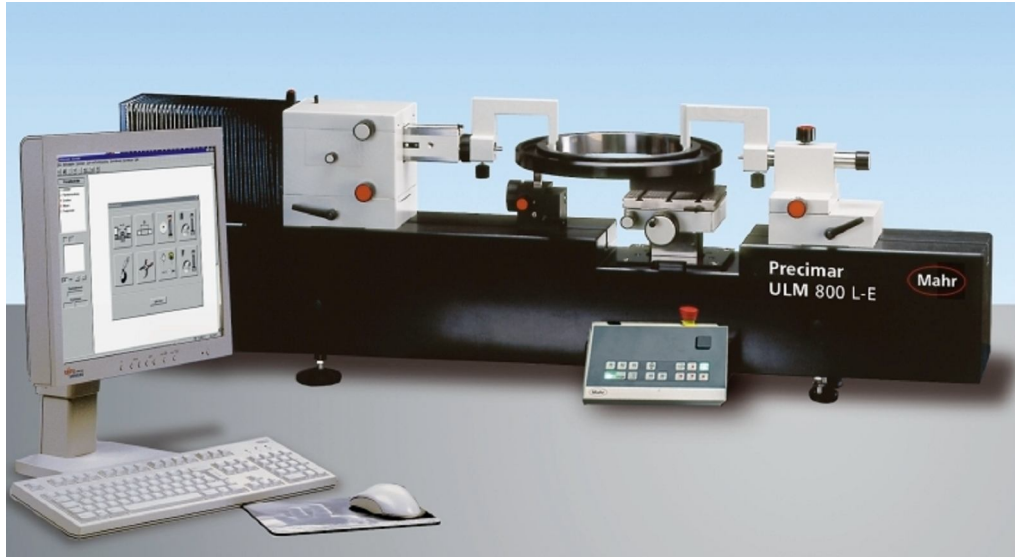


Рисунок 1.14 – Горизонтальный длиномер Precimar ULM 800 L-E со встроенным лазерным интерферометром, фирма «Mahr GmbH» (Германия)

Единственным недостатком длиномеров, как средств измерений среднего диаметра резьбовых калибров, может являться отсутствие возможности измерений конических резьбовых калибров. В 2008 году совместными усилиями фирмы «Trimos S.A.» (Швейцария), ООО «Мастер-Сервис» (представитель изготовителя в России), ООО «ВНИИБТ – Буровой инструмент» (Пермь) и ВНИИМ велась разработка специального аксессуара к длиномеру модели LabConcept Premium, предназначенного для измерений конических резьбовых калибров-пробок и калибров-колец. Конструктивно аксессуар представлял собой штатив для патрона с Т-образным щупом. На штативе смонтировано отсчетное устройство, позволяющее измерять величину вертикального перемещения патрона и, соответственно, щупа (рисунок 1.15).

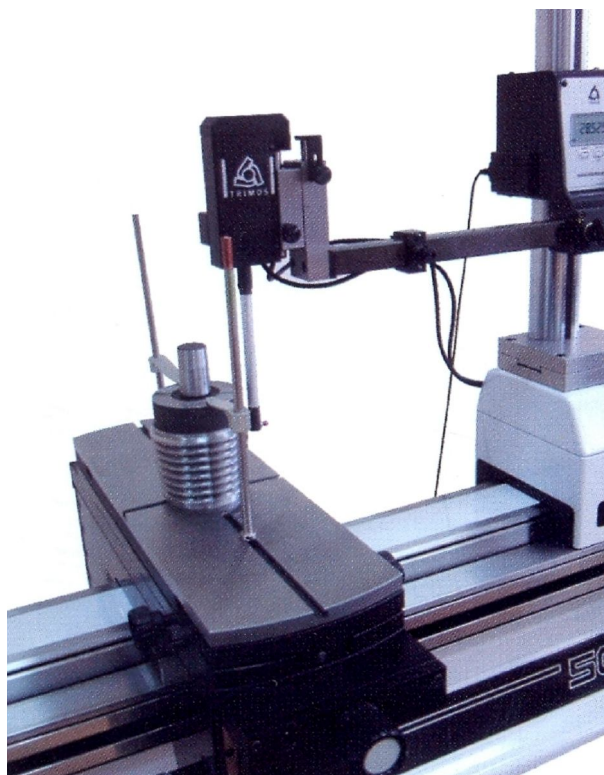


Рисунок 1.15 – Общий вид горизонтального длиномера LabConcept Premium с установленным аксессуаром для измерений среднего диаметра конических резьбовых калибров

Присоединительный шток T-образного щупа был удлинен для того, чтобы можно было выполнять измерения диаметра в нескольких сечениях по длине калибра. Затем, по результатам нескольких измерений, средний диаметр калибра в основной плоскости рассчитывался математически. При этом в процессе измерений снимались данные о тринадцати точках, принадлежащих разным участкам калибра, что позволяло вычислять не только величину среднего диаметра, но также конусность по среднему диаметру и шаг резьбы.

Данный аксессуар был изготовлен всего в трех экземплярах и опыт его практического применения неудачен. Измерительная система в совокупности получила несколько дополнительных степеней свободы, на каждой из которых накапливались погрешности, дающие в сумме величину, неприемлемую для задачи измерений среднего диаметра резьбовых калибров. Поэтому аксессуар не был запущен в серийное производство, однако, эксперимент показал, что сама

возможность расширения области применения длиномеров на конические резьбовые калибры существует.

#### **1.4.1.2 Координатные измерительные машины**

Поскольку координатные измерительные машины (КИМ) предназначены для трехмерных измерений геометрических параметров различных изделий, использование таких средств в области измерений резьбовых калибров является логичным. На рисунке 1.16 показана КИМ Moog 48M, используемая в НМИ Италии (INRIM) и США (NIST).

На практике при измерениях резьбы на КИМ реализуется описанный выше метод трех проволочек. Отличие состоит в том, что в данном случае вместо цилиндрических проволочек используются сферические наконечники контактного щупа КИМ. Конструктивно такой щуп представляет собой моноблок с несколькими наконечниками, расположенными перпендикулярно (рисунок 1.17).

Использование традиционного контактного щупа с одной сферой здесь невозможно, поскольку для измерений среднего диаметра резьбы требуется осуществление контакта с профилем с двух противоположных сторон детали или калибра, а смена ориентации щупа каждый раз должна сопровождаться повторной калибровкой.

Основные достоинства использования КИМ в области измерений резьбовых соединений:

- 1) большой диапазон измеряемых размеров – существуют координатные измерительные машины, размер портала которых достигает нескольких метров;
- 2) возможность измерений конических калибров за счет возможности осуществления комплексных измерений по трем координатам. Как было описано выше, при измерении среднего диаметра конического резьбового калибра принципиальное значение имеет не только сам диаметр, но и расстояние от торца калибра до плоскости, в которой этот диаметр измеряется.



Рисунок 1.16 – Общий вид КИМ Moore 48М

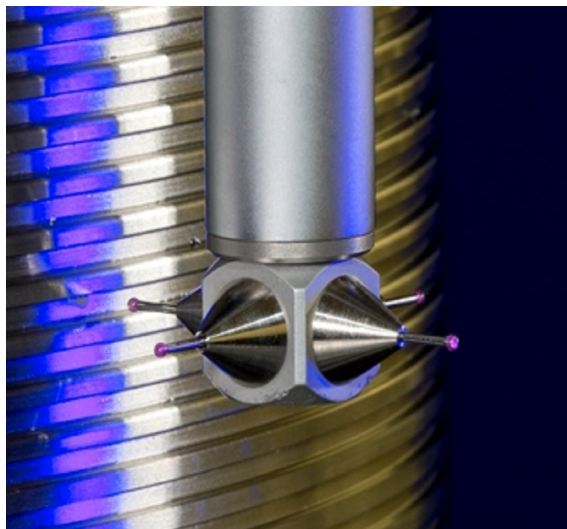


Рисунок 1.17 – Контактный щуп КИМ для измерений параметров резьбы

Основные недостатки:

1) необходимость дополнительного оснащения КИМ специальными контактными щупами. Здесь речь идет не только о конструкции самого щупа. Как было сказано ранее, метод трех проволочек предполагает использование, собственно, проволочек, номинальный диаметр которых рассчитывается в зависимости от шага резьбы. Таким образом, для того, чтобы охватить наибольшую номенклатуру резьбовых калибров, необходимо иметь в наличии наборы щупов со специально подобранными диаметрами сферических наконечников, что не всегда осуществимо на практике;

2) относительно высокая погрешность. При измерениях сложных объектов, к которым относятся и резьбовые калибры, с помощью КИМ перемещение измерительного щупа КИМ происходит по трем осям со считыванием данных, соответственно, с трех отсчетных шкал одновременно. Первая составляющая абсолютной погрешности измерений КИМ, как правило, не ниже  $\pm 1,5$  мкм, а фактическая погрешность значительно зависит от измеряемой величины и увеличивается с диапазоном измерений. Величина расширенной неопределенности измерений среднего диаметра резьбового калибра также составляет 1,5 мкм и выше.

Говоря о КИМ, нельзя оставить без внимания измеритель геометрических параметров резьбовых и гладких калибров MasterScanner фирмы «IAC Geometrical Engineers» (Нидерланды) (далее – измеритель). Такое СИ применяется, в частности, НМИ Китая (таблица 1.2).

Принцип действия основан на считывании с измерительных шкал информации о перемещении контактного щупа, поэтому данное средство измерений следует отнести именно к КИМ (рисунок 1.18).



Рисунок 1.18 – Общий вид измерителя параметров резьбовых и гладких калибров  
MasterScanner

В процессе измерений контактный Т-образный щуп сканирует профиль резьбового калибра в осевой плоскости (рисунок 1.19) и в режиме реального времени передает получаемое двухмерное изображение профиля в программное обеспечение для последующей обработки (рисунок 1.20).

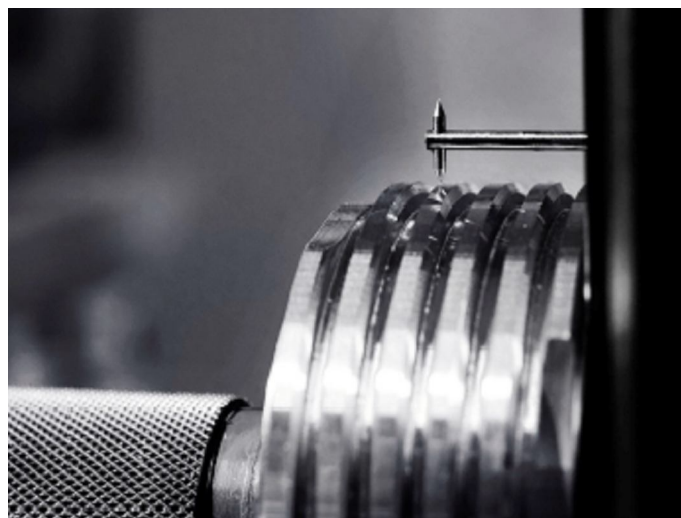


Рисунок 1.19 – Измерение геометрических параметров резьбового  
калибра-пробки с помощью измерителя MasterScanner



Таким образом, теоретической основой работы измерителя является проекционный метод измерений. Отличие состоит в том, что изображение профиля резьбового калибра здесь получено контактным способом.

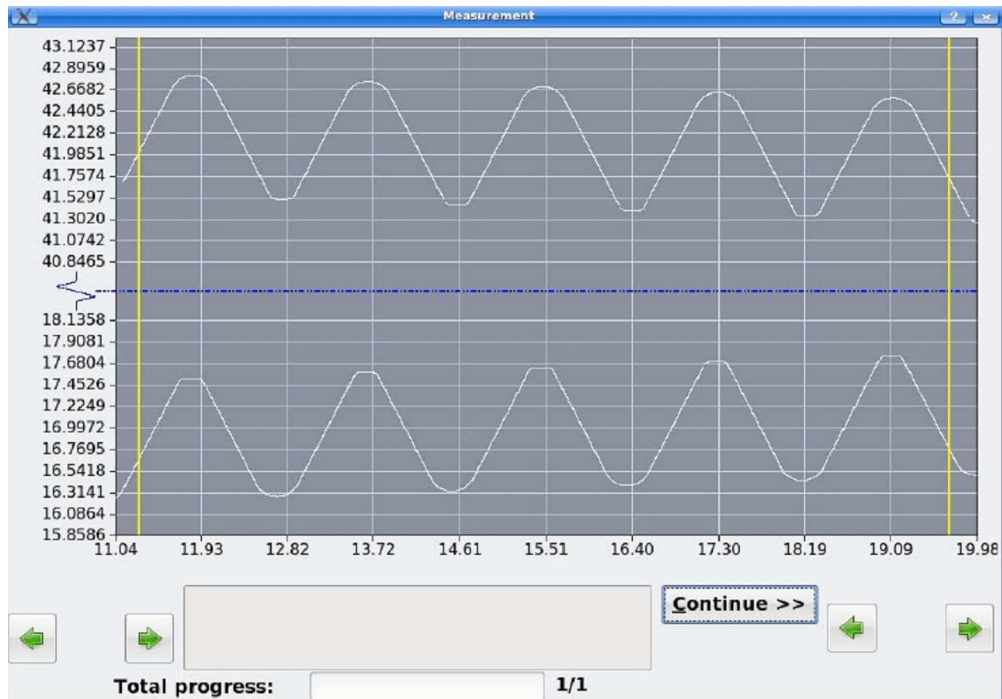


Рисунок 1.20 – Графическое отображение профиля резьбы в программном обеспечении измерителя MasterScanner

Интерпретация проекционного метода в данном случае гораздо ближе к теоретической, так как получаемое с помощью контактного сканирования изображение профиля резьбы точнее соответствует осевому сечению калибра, в отличие от полученного традиционным проекционным методом, недостатки которого были описаны выше [24]. Точность совмещения плоскости сканирования с осевой плоскостью калибра достигается, с одной стороны, за счет использования контактного щупа с наконечниками малого радиуса (фактически это иглы), с другой – с помощью компенсации неточности установки щупа в патроне измерителя при калибровке по гладким измерительным кольцам или пробкам.

Основными достоинствами измерителя MasterScanner являются:

1) возможность осуществления комплексного контроля геометрических параметров резьбовых калибров. Обработка полученного с помощью измерителя

профиля в программном обеспечении позволяет получить полную информацию не только о среднем диаметре, но и о шаге, угле профиля, конусности резьбы калибра;

2) высокая степень автоматизации. Практически, измеритель выполняет сканирование самостоятельно, без участия оператора, основываясь на введенных в программное обеспечение данных о типе и номинальном размере калибра;

3) возможность проведения измерений как цилиндрических, так и конических резьбовых калибров;

4) относительно низкая погрешность измерений, соответствующая КИМ (порядка  $\pm 1,5$  мкм).

Основные недостатки:

1) относительно небольшой диапазон измерений в сравнении с КИМ. Самый большой серийно выпускаемый измеритель MasterScanner охватывает пробки диаметром до 150 мм и кольца до 160 мм;

2) высокая расширенная неопределенность измерений среднего диаметра резьбовых калибров. По данным China NMI, указанным в базе СМС ВІРМ, расширенная неопределенность измерений составляет 3 мкм;

3) узкая специализация измерителя. Область применения измерителя MasterScanner – исключительно измерения гладких и резьбовых калибров. Таким образом, востребованным данное средство измерений может быть в первую очередь на крупных производствах, где необходим поточный контроль большого количества применяемых калибров. В большинстве случаев использование в этих целях других СИ гораздо целесообразнее.

На данный момент успешно проведена процедура внесения измерителя MasterScanner в Государственный реестр средств измерений РФ. Данный процесс не обошелся без вопросов, корни которых уходят в общую ситуацию с резьбовыми калибрами в России, описанную выше. Чтобы внести данное СИ в Государственный реестр в рамках Федерального закона «Об обеспечении единства измерений» № 102-ФЗ от 26.06.2008 г., необходимо соответствующее метрологическое обеспечение. Измеритель следует поверять только с

использованием резьбовых и гладких калибров. Это действительно так, конструкция измерителя не дает других вариантов. При этом необходимо, чтобы используемые калибры имели действующие свидетельства о поверке. А, следовательно, надо иметь в наличии резьбовые калибры, также внесенные в Государственный реестр средств измерений РФ. Такая ситуация также является следствием неоднозначности подхода к формальному статусу резьбовых калибров в отечественной метрологии.

### **1.4.1.3 Проекционные средства измерений**

Проекционные СИ предназначены для измерений двухмерных деталей, и их использование для измерений резьбы и резьбовых калибров является дополнительной опцией.

Конструктивно все СИ такого рода в тождественны друг другу (рисунок 1.21, а). Осветитель подсвечивает размещенный в плоскости измерительного стола объект, проекционное изображение которого передается на экран. Разметка на экране и снабжение стола микрометрическими винтами обеспечивают возможность наведения на отдельные участки изображения и измерения различных геометрических элементов. Для измерения деталей вращения используют аксессуар, представляющий собой дополнительный столик с центрами для установки измеряемого объекта (рисунок 1.21, б). Конструктивно они также не имеют принципиальных отличий у различных изготовителей.

К достоинствам проекционных СИ можно отнести высокую универсальность. При работе с резьбой и резьбовыми калибрами реализуется возможность комплексных измерений по нескольким параметрам (диаметры, шаг, угол профиля) без изменения установки.

Основные недостатки: маленький диапазон измерений (как правило, не превышает 350 мм), и высокая погрешность. Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений составляют не менее  $\pm 2,5$  мкм.



а



б

Рисунок 1.21 – Измерительный проектор Mitutoyo (Япония) PJ-A3000 (а),  
аксессуар для измерений деталей вращения (б)

Типичной для данных СИ является возможность экспорта проекционного изображения в среду ПО с последующей обработкой. Очевидным представляется и следующий шаг: превращение измерительного проектора в планшетный сканер. Такое решение реализовано фирмой «Werth Messtechnik GmbH» (Германия) в измерительном проекторе Shaft Score. На рисунке 1.22 данный проектор изображен с установленными суппортами для деталей вращения.

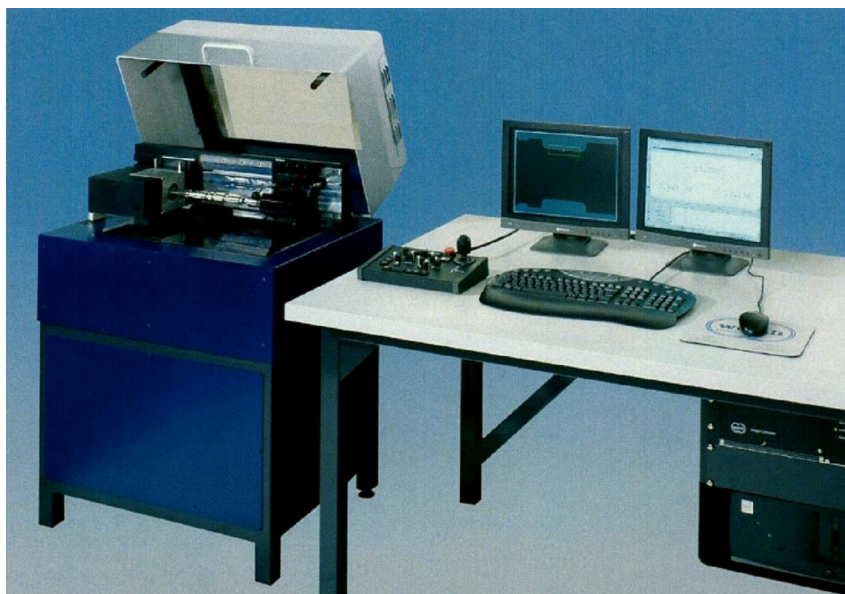


Рисунок 1.22 – Измерительный проектор Shaft Score, «Werth Messtechnik GmbH»  
(Германия)

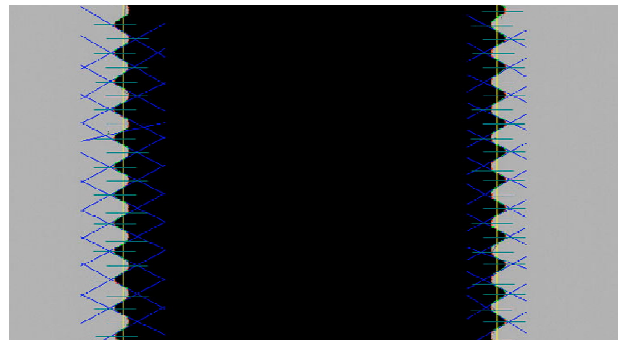
Диапазон измеряемых диаметров (0-200) мм, пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений:  $\pm(2,5+D/120)$  мкм, где  $D$  – в миллиметрах.

Аналогичный принцип используется в оптических измерительных машинах итальянской фирмы «ViciVision Manufactures». Отличие том, что данное СИ предназначено исключительно для тел вращения. Конструкция СИ предполагает установку измеряемой детали вертикально между источником и приемником света. Кроме того, есть возможность автоматического вращения измеряемой детали с последовательным измерением геометрических параметров в разных сечениях (рисунок 1.23). Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений не превышают  $\pm(2,0+D/100)$  мкм, где  $D$  – измеряемый диаметр в миллиметрах.

Как видно из формул абсолютной погрешности для измерительного проектора ShaftScore и измерительной системы «ViciVision», абсолютная погрешность измерений резко возрастает с увеличением измеряемого диаметра, что делает оба СИ пригодными только для рабочих деталей.



а



б

Рисунок 1.23 – Общий вид измерительной системы фирмы «ViciVision Manufactures» (а), проекционное изображение резьбовой детали в среде ПО «ViciVision» (б)

К СИ, реализующим проекционный метод, можно отнести и широко применяемые в настоящее время установки, основанные на принципах компьютерной томографии [25]. В частности, так называемые измерительные томографы присутствуют среди модельного ряда таких изготовителей, как «Carl Zeiss AG», «Werth Messtechnik GmbH», «General Electric». К достоинствам таких СИ можно отнести возможность комплексного контроля резьбового соединения по результатам программного анализа полного трехмерного профиля резьбы, получаемого при использовании томографа. Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений при этом составляют  $\pm 4,5$  мкм и выше [26]. Таким образом, использование измерительных томографов может быть обосновано только для контроля рабочей резьбы. Однако, метрологические характеристики таких СИ позволяют применять их вместо резьбовых калибров. Это может быть неоправданно с экономической точки зрения, но, с другой стороны, в данном случае речь будет идти о комплексном контроле резьбы, что невозможно обеспечить с помощью калибров.

#### **1.4.1.4 Лазерные измерительные системы**

В области геометрических измерений наибольшей точностью обладают системы, имеющие в составе лазеры и так или иначе основанные на принципах лазерной интерферометрии. Использование лазерных бесконтактных СИ могло бы значительно повысить точность определения геометрических параметров резьбовых калибров. А лазерное сканирование в настоящее время является вполне доступной и хорошо исследованной технологией. Однако, при работе с резьбовыми элементами точность лазерных систем снижается по тем же причинам, что и точность любых оптических измерителей, как это было сказано выше. Основной фактор – отсутствие возможности точного наведения на осевую плоскость калибра или резьбы из-за характерной геометрии, а также, что более критично для лазеров, из-за текстуры поверхности резьбы, которая не обладает необходимой отражающей способностью. В связи с этим, погрешность лазерных

измерительных систем в области резьбовых соединений, как правило, имеет порядок  $\pm(2-5)$  мкм [27, 28, 29], т.е. использование таких СИ не дает существенного преимущества по сравнению с контактными методами измерений.

Помимо длиномеров и КИМ, пример использования лазерных интерферометров – уникальная разработка английской лаборатории NPL – интерференционная система для измерения шага резьбовых калибров (рисунок 1.24).

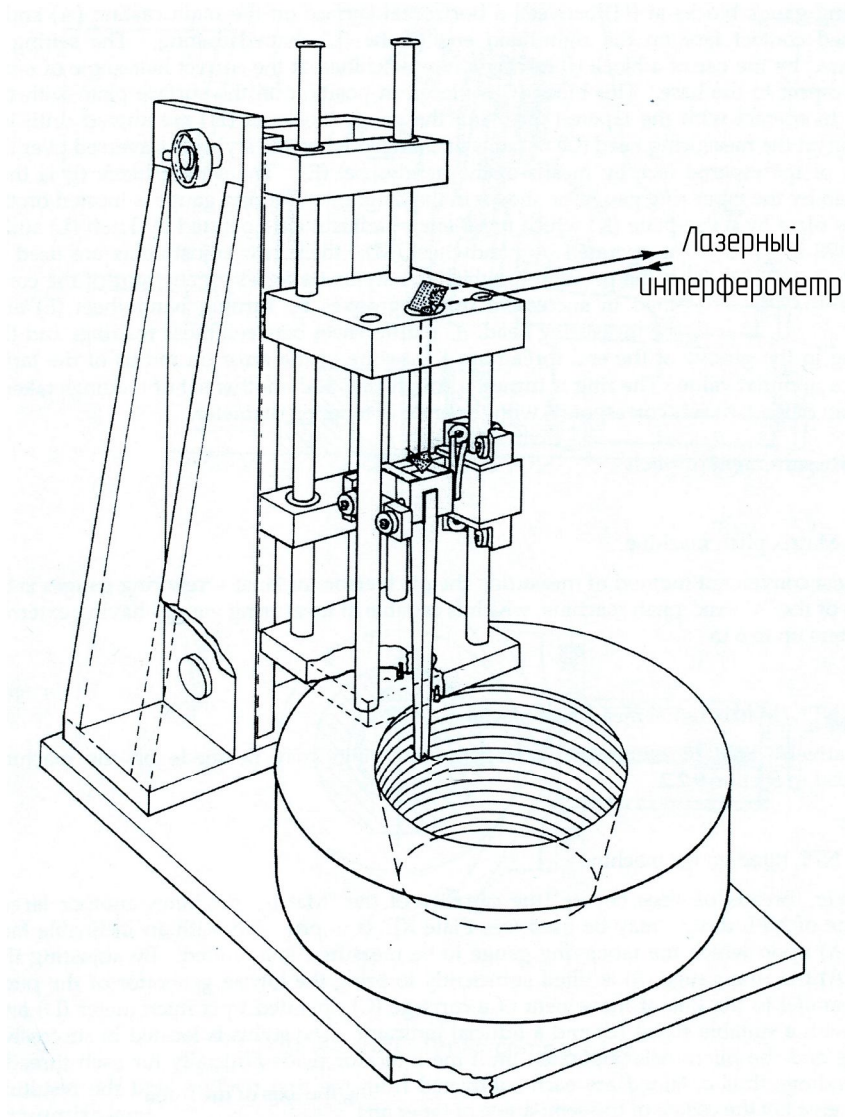


Рисунок 1.24 – Система для измерения шага резьбовых калибров  
(NPL, Великобритания)

Конструктивно СИ представляет собой вертикальную колонну, вдоль направляющих которой перемещается специальная рамная конструкция с

закрепленным контактнм щупом. Перемещение измеряется за счет включения установки в подвижное плечо лазерного интерферометра [30]. Описанное СИ является прототипом и информация о его метрологических характеристиках недоступна. Однако, можно сказать, что использование лазерного интерферометра в данном случае мало оправданно. Как правило, лазеры применяются исключительно в тех технических нишах, где их невозможно заменить чем-либо другим. Шаг резьбовых калибров на данном этапе развития промышленности не нормируется со столь высокой точностью, чтобы для его измерений могли понадобиться лазерные интерферометры.

#### **1.4.1.5 Ручной инструмент**

Описывая СИ параметров резьбы от эталонных до рабочих, надо сказать о ручном инструменте – резьбовых микрометрах и резьбовых нутромерах. Изготовители: «Sylvac S.A.» (Швейцария), «MaHR GmbH» (Германия), «Bowers Group» (Великобритания), «Mitutoyo» (Япония).

Резьбовые микрометры предназначены для контроля среднего диаметра наружной резьбы и резьбовых калибров-пробок. Такое СИ представляет собой микрометр со специальными резьбовыми наконечниками, которые выбираются в зависимости от номинального шага резьбы, а по принципу действия резьбовой микрометр можно отнести к своего рода универсальному резьбовому калибру.

Принцип действия резьбовых нутромеров для измерений среднего диаметра внутренней резьбы схож с нутромерами для измерений внутреннего диаметра отверстий. Двухточечные нутромеры имеют резьбовые наконечники, аналогично микрометрам. Трехточечные применяются совместно с резьбовыми насадками, у которых рабочие поверхности выполнены в виде профиля наружной резьбы.

Метрологические характеристики таких СИ ограничиваются точностью измерений резьбовых калибров, по которым производится их установка. Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений составляют  $\pm(3-6)$  мкм при расширенной неопределенности измерений не менее 2 мкм.



### 1.4.2 Отечественные средства измерений

Говоря об отечественных средствах измерений параметров резьбы, следует отметить, что ситуация в данной области сложная. Материальная база центров стандартизации и метрологии (ЦСМ) в России в большинстве случаев основана на наследии СССР. Притом, что в России существует более ста ЦСМ, лишь треть из них оказывает услуги по калибровке резьбовых калибров, а большинство не охватывает все типы и диапазоны калибров. Традиционно лучше ситуация обстоит в крупных промышленных центрах (Пермь, Челябинск, и пр.), но это скорее исключение. В то же время потребность в точных измерениях резьбовых калибров постоянно возрастает. В качестве подтверждения на рисунке 1.25 приведена диаграмма, на которой указана доля резьбовых калибров в объеме калибровочных работ лаборатории метрологического обеспечения специализированных средств измерений геометрических величин, параметров резьбы и средств измерений неразрушающего контроля отдела геометрических измерений ВНИИМ за последние 5 лет.

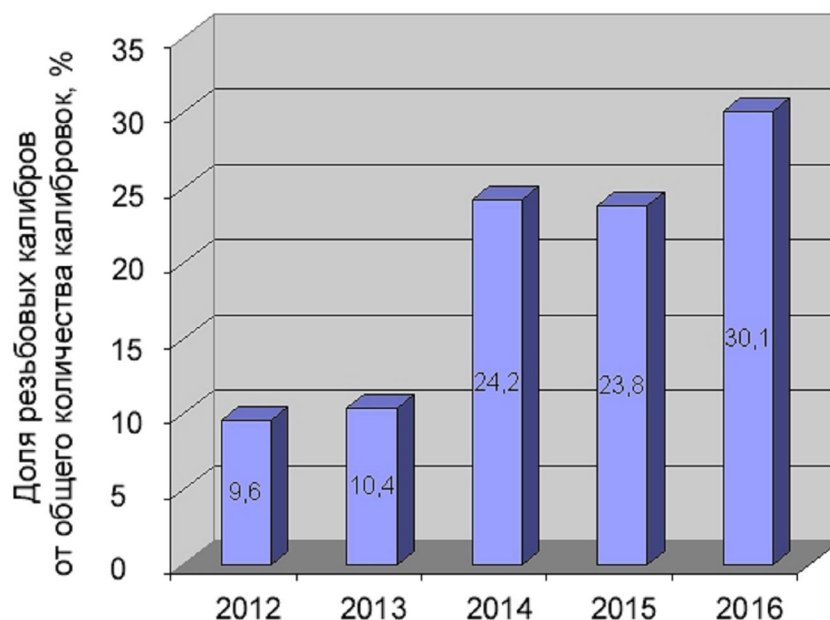
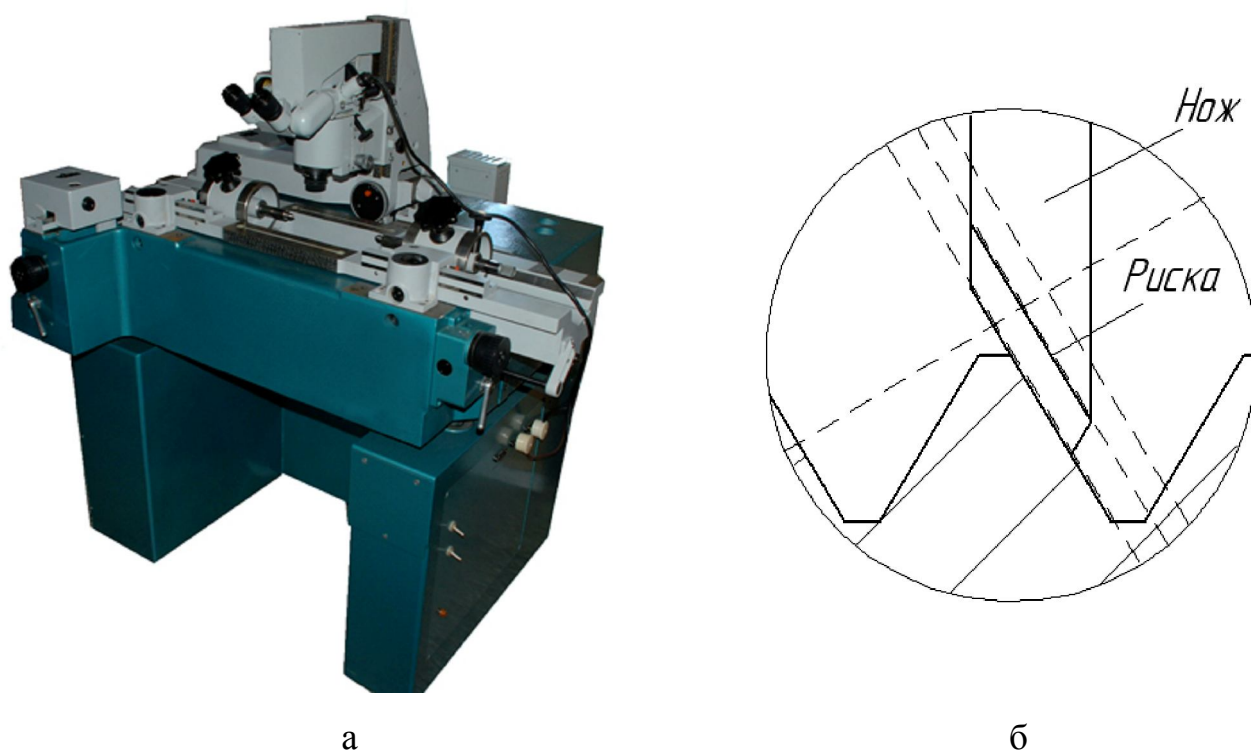


Рисунок 1.25 - Доля резьбовых калибров в объеме калибровочных работ лаборатории метрологического обеспечения специализированных средств измерений геометрических величин, параметров резьбы и средств измерений неразрушающего контроля ВНИИМ за период 2012 – 2016 гг.

### 1.4.2.1 Двухкоординатные измерительные приборы

Двухкоординатный измерительный прибор (ДИП) предназначен для измерений плоских двумерных объектов (рисунок 1.26). В основе – проекционная система с возможностью работы как в проходящем, так и в отраженном свете. Оптические энкодеры, установленные вдоль направляющих подвижных кареток прибора, позволяют производить отсчет по двум координатам. Поворотный механизм, связанный с визирной системой прибора, позволяет производить также отсчет углов.



а – общий вид, б – использование измерительных ножей

Рисунок 1.26 – ДИП (фирма «ЛОМО», Россия)

Данное СИ на протяжении многих десятилетий составляет основу технической базы многих российских метрологических лабораторий на производствах и в ЦСМ. В последние годы активно проводится модернизация ДИП за счет установки дифракционных линеек высокого разрешения и замены окулярной системы визирования на цифровую. Такие решения позволяют также

произвести интеграцию СИ с персональными компьютерами, что повышает скорость обработки и систематизации результатов измерений.

Конструкция одной из кареток ДИП предусматривает использование центров вместо предметного стола, что распространяет область применения СИ и на тела вращения, в том числе резьбовые калибры. При этом в число аксессуаров входят так называемые измерительные ножи, предназначенные специально для измерений параметров резьбы. Ножи устанавливаются в специальных приспособлениях на каретке ДИП с противоположных сторон от оси калибра. Затем приводят лезвия ножей в контакт с профилем резьбы (рисунок 1.26, б). Наведение при этом выполняют не на контур профиля, а на риски, нанесенные на ножах. Расстояние от риски до лезвия нормируется.

При таком способе наведения минимизируется погрешность, связанная с искажением осевого сечения резьбы, получаемого проекционным методом. Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений среднего диаметра резьбы составляют  $\pm 1,5$  мкм и выше. Расширенная неопределенность измерений порядка 2 мкм.

#### **1.4.2.2 Прибор для контроля конических резьбовых калибров**

СИ уникальное в своем роде, но не получившее широкого распространения. Оригинальная разработка относится к шестидесятым годам прошлого века. Согласно основным техническим данным [31], СИ предназначено для контроля шага и конусности по среднему диаметру калибров-пробок и калибров-колец. Конструктивно это база с крепежными зажимами для установки калибра параллельно измерительной оси. В качестве щупа используется Т-образный контактный щуп со сферическими наконечниками, положение которого определяется с помощью отсчетных головок. Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений составляют  $\pm 2,5$  мкм.

В начале 2000-х годов прибор был модернизирован специалистами Челябинского Инструментального завода. Новый 481-й получил английские

энкодеры Renishaw вместо аналоговых отсчетных головок. Также была реализована возможность подключения СИ к персональному компьютеру, написано специальное программное обеспечение (рисунок 1.27).



Рисунок 1.27 – Общий вид модернизированного прибора 481 КМ 2

Благодаря модернизации, с помощью данного СИ стало возможно производить измерения не только конусности и шага, но и диаметров калибров в основной плоскости с погрешностью не более  $\pm 2$  мкм.

Было выпущено и введено в эксплуатацию всего несколько экземпляров модернизированного прибора. Причины аналогичны ситуации с описанным выше измерителем Master Scanner - узкая область применения и низкий спрос.

### **Выводы к главе 1**

В данной главе даны краткие сведения о резьбовых соединениях, областях их применения, метрологическом обеспечении. Приведены данные о методах и средствах измерений, используемых в этой области. Основные показатели точности различных типов СИ отражены в сводной диаграмме на рисунке 1.28.

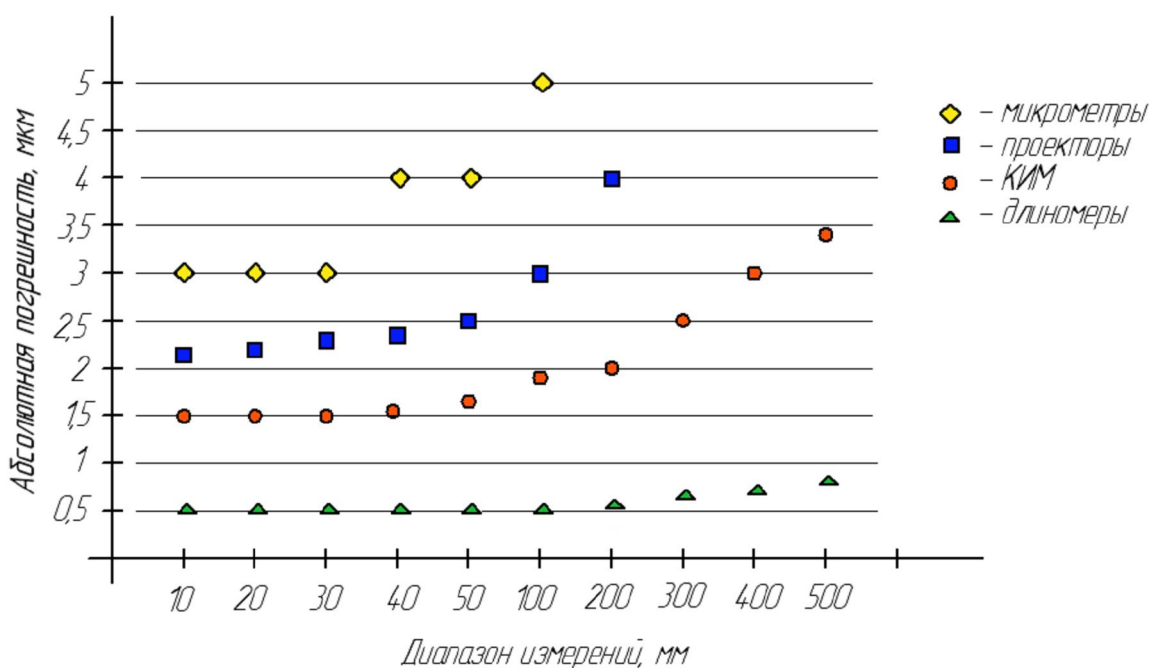


Рисунок 1.28 – Диаграмма наилучших показателей абсолютной погрешности измерений среднего диаметра резьбовых калибров для различных типов СИ

Как видно из диаграммы, горизонтальные длиномеры обладают наименьшей погрешностью на большом диапазоне измерений.

Следует обратить внимание на то, что при всем многообразии СИ, область применения которых распространяется на резьбовые соединения, нерешенным остается вопрос системного подхода к резьбовым калибрам с точки зрения их формального статуса при передаче единицы рабочим резьбам. Представляется необходимым совершенствование эталонной базы в области метрологического обеспечения резьбовых соединений, утверждение резьбовых калибров в качестве эталонных средств измерений, разработка эталонных комплексов по измерениям резьбовых калибров, подготовка соответствующей нормативной основы, осуществление международных сличений резьбовых калибров.

Приведенные выше показатели погрешности измерений, а также описанные достоинства горизонтальных длиномеров в части измерений среднего диаметра резьбовых калибров, обосновывают целесообразность использования подобного СИ в качестве базы для создания эталонного комплекса в данной области.

## Глава 2. Высокоточный измерительный комплекс ВНИИМ для поверки и калибровки резьбовых калибров

### 2.1 Состав высокоточного измерительного комплекса для поверки и калибровки резьбовых калибров

Исходя из данных, изложенных в главе 1, в отделе геометрических измерений ВНИИМ было принято решение использовать в составе высокоточного измерительного комплекса для поверки и калибровки резьбовых калибров (далее – комплекс) в процессе создания системы метрологического обеспечения резьбовых соединений следующие СИ:

- установка для измерений среднего диаметра резьбовых калибров-пробок и калибров-колец (далее – установка) на базе горизонтального длиномера;
- прибор двухкоординатный измерительный ДИП-1 для измерений шага и угла профиля резьбы калибров.

Структурная схема комплекса показана на рисунке 2.1.

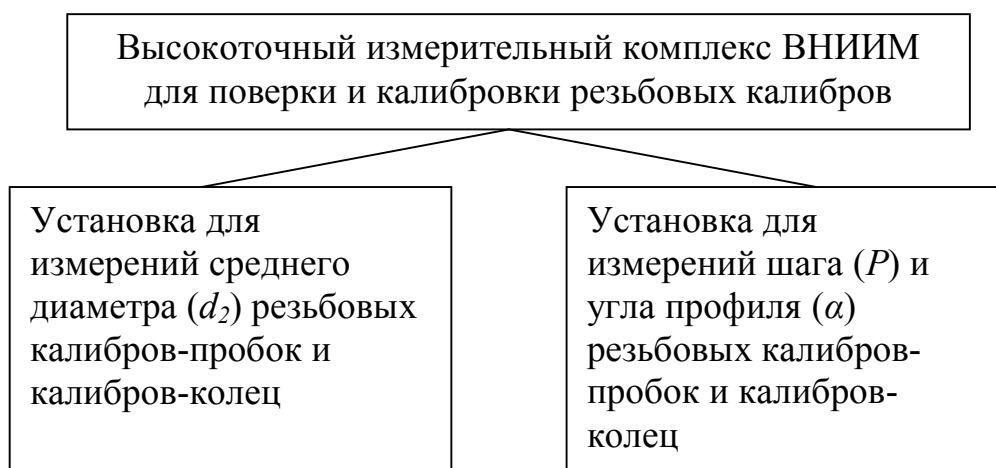
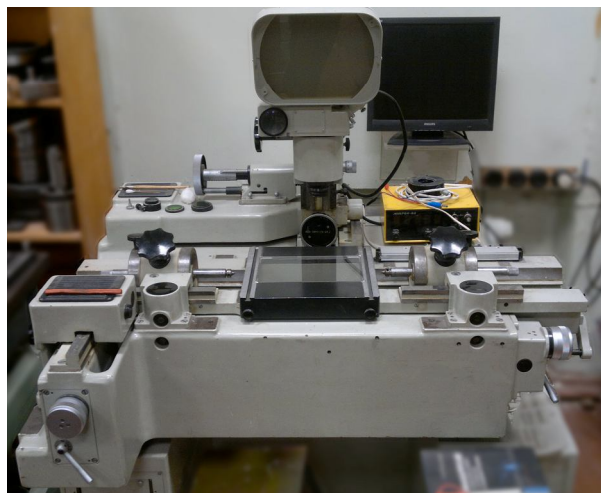


Рисунок 2.1 – Структурная схема комплекса

### 2.1.1 Установка для измерений шага и угла профиля резьбовых калибров

Для измерений шага и угла профиля резьбы калибров в состав комплекса включен Государственный рабочий эталон 3 разряда единицы длины в диапазоне  $10^{-4}$  – 200 мм по ГОСТ Р 8.763-2011 (регистрационный № 3.1.ZZB.0196.2015). В основе данного эталона прибор двухкоординатный измерительный ДИП-1. В ходе модернизации прибора в 2007 году ДИП-1 был снабжен высокоточными дифракционными энкодерами фирмы «Renishaw plc» (Великобритания) и программным обеспечением для выполнения измерений сложных геометрических элементов (рисунок 2.2).

При этом угловые величины измеряются на модернизированном приборе ДИП-1 косвенно без использования отсчетов по угловому лимбу. Определение углов происходит по результатам программной обработки линейных координат, соответствующих величинам перемещений каретки прибора по двум осям. Таким образом, отпадает необходимость установления прослеживаемости угловых величин к государственному первичному эталону единицы плоского угла ГЭТ 22-2014.



а



б

а – общий вид прибора ДИП-1; б – дифракционные энкодеры, внедренные в конструкцию прибора

Рисунок 2.2 - Государственный рабочий эталон 3 разряда единицы длины в диапазоне  $10^{-4}$  – 200 мм

Эталон имеет следующие метрологические характеристики:

Диапазон измерений длины:

- по координате X  $(10^{-4}-200)$  мм;
- по координате Y  $(10^{-4}-100)$  мм.

Доверительные границы абсолютных погрешностей при доверительной вероятности 0,99 составляют  $\pm(0,2+2\cdot L)$ , мкм, где L - измеряемая длина в м.

### **2.1.2 Установка для измерений среднего диаметра резьбовых калибров**

В период 2011-2012 гг. во ВНИИМ была проведена работа по изучению современных горизонтальных длиномеров высокой точности с целью оценки возможности использования СИ такого типа в качестве основы для высокоточного измерительного комплекса в области измерений основного параметра резьбовых калибров – среднего диаметра. По результатам этого исследования выбор был сделан в пользу горизонтального длиномера, обладающего следующими свойствами:

- высокие метрологические характеристики;
- возможность интегрирования системы температурной компенсации;
- внедрение элементов программного управления;
- возможность установки специального измерительного стола усиленной конструкции, рассчитанного на высокую массу измеряемых объектов, в частности, резьбовых калибров;
- номенклатура дополнительных приспособлений, позволяющая не только выполнять измерения среднего диаметра резьбовых калибров, но и использовать данное СИ для большого перечня измерительных задач и сделать весь комплекс в целом более универсальным.

Общий вид установки представлен на рисунке 2.3.





Рисунок 2.3 – Общий вид установки ВНИИМ для измерений среднего диаметра резьбовых калибров

Диапазон абсолютных измерений определяется перемещением измерительной каретки и составляет (0-350) мм, относительных – максимальной длиной установочной меры, он находится в пределах (0-1100) мм.

Благодаря наличию специальных приспособлений, область применения СИ распространена на измерения эталонных плоскопараллельных концевых мер длины и эталонных измерительных колец. Высокими требованиями к точности измерений также обусловлен ряд технических решений, направленных на создание соответствующих условий содержания и применения установки.

## **2.2 Конструктивные особенности и метрологические характеристики установки для измерений среднего диаметра резьбовых калибров**

В качестве отсчетного устройства в установке используется дифракционная линейка фирмы «Heidenhain GmbH» (Германия) с дискретностью 1 нм. Допускаемая абсолютная погрешность измерений составляет  $\pm(0,05+0,5L)$  мкм, где  $L$  – измеряемая величина в метрах. Эта характеристика улучшена на 30 % по

сравнению с данными, заявленными при внесении данного СИ в Государственный реестр, и подтверждена результатами исследований с использованием государственного вторичного эталона единицы длины – метра (регистрационный № 2.1.ZZB.0027.2013), а также эталонных плоскопараллельных концевых мер длины и эталонных измерительных колец. Передача единицы длины с прослеживаемостью к ГЭТ 2-2010 осуществляется, в частности, от лазерной интерференционной системы из состава государственного вторичного эталона единицы длины – метра.

Уменьшить абсолютную погрешность измерений можно с помощью технических решений, реализованных в установке, и специальных условий ее содержания и эксплуатации. Рассмотрим эти решения подробнее.

СИ установлено в специально подготовленном помещении, в котором круглосуточно поддерживается температура  $(20,0 \pm 0,1)$  °С, равномерно распределенная по объему. Это было достигнуто, в том числе, за счет специальной планировки помещения, позволяющей обеспечить такое относительное расположение установки и системы поддержания температуры, при котором минимизированы возможные критичные перераспределения потоков воздуха в области установки, а само температурное поле стабильно и поддается детальному изучению.

Установка снабжена системой температурной компенсации, учитывающей в режиме реального времени температуры установки и измеряемого объекта, и вносящей соответствующие поправки в результаты измерений. Система состоит из двух температурных датчиков: один расположен в основании длиномера из состава установки, второй закрепляется на измеряемом объекте. Информация о температуре с обоих датчиков поступает в специализированное программное обеспечение с частотой в один опрос в секунду.

В системе отслеживаются изменения температуры с течением времени, на основании полученных данных выдаются рекомендации по оценке достоверности результатов измерений в конкретных температурных условиях.

Чтобы избежать влияния внешних вибраций на процесс измерений СИ размещено на специальном виброзащитном столе со встроенной пневматической системой с обратной связью, позволяющей автоматически регулировать горизонтальное положение длиномера из состава установки и компенсирующей изменение центра тяжести при перемещении подвижных кареток и измерительного стола. Виброзащитный стол изготовлен фирмой «Daeil Systems» (Корея) по специальному проекту на основе параметров массы и габаритных размеров используемого горизонтального длиномера. Такая установка особенно важна при работе именно с резьбовыми калибрами, масса которых при значительных номинальных диаметрах достигает десятков килограммов. Исходя из этих же соображений, в комплект СИ на этапе формирования технического задания был включен измерительный стол с увеличенной грузоподъемностью. Данный стол рассчитан на массу измеряемой детали до 80 кг.

Горизонтальный длиномер из состава установки имеет конструктивные особенности, принципиально отличающие его от аналогов.

Измерительная каретка перемещается только в автоматическом режиме, это позволяет полностью исключить погрешности, связанные со сбоем счета, так как скорость перемещения подвижных узлов ограничена и не может превышать значений, предусмотренных технической документацией (рисунок 2.4).

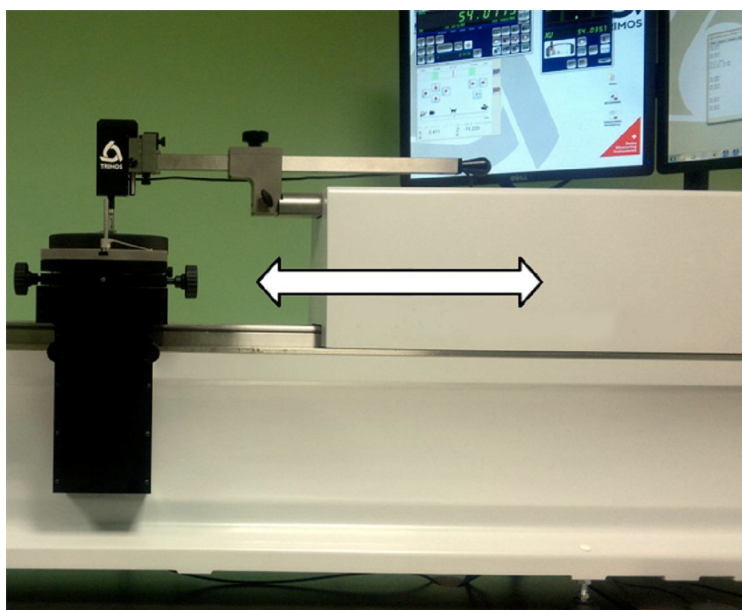


Рисунок 2.4 – Измерительная каретка горизонтального длиномера

Измерительный стол длиномера снабжен электроприводом, управляющим вертикальным и горизонтальным перемещениями (рисунок 2.5). Такое решение позволяет точно позиционировать измеряемый объект, в частности резьбовой калибр, относительно измерительных наконечников и измерительной оси.

Оснащение измерительной каретки и измерительного стола управляемыми приводами позволяет минимизировать вклад в результат измерений погрешностей, связанных с человеческим фактором.

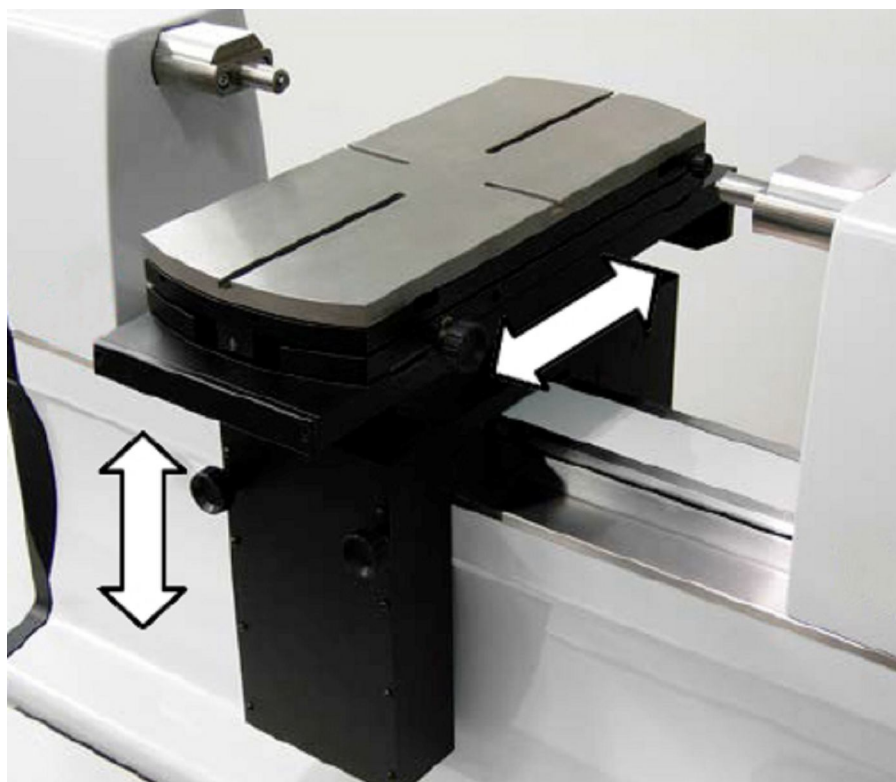


Рисунок 2.5 – Измерительный стол длиномера

СИ имеет систему автоматического задания и приложения измерительного усилия с дискретностью 0,01 Н, что позволяет исключить погрешность, связанную с различным характером приложения измерительного усилия при многократных измерениях (рисунок 2.6).



Рисунок 2.6 – Индикатор измерительного усилия в программном обеспечении установки

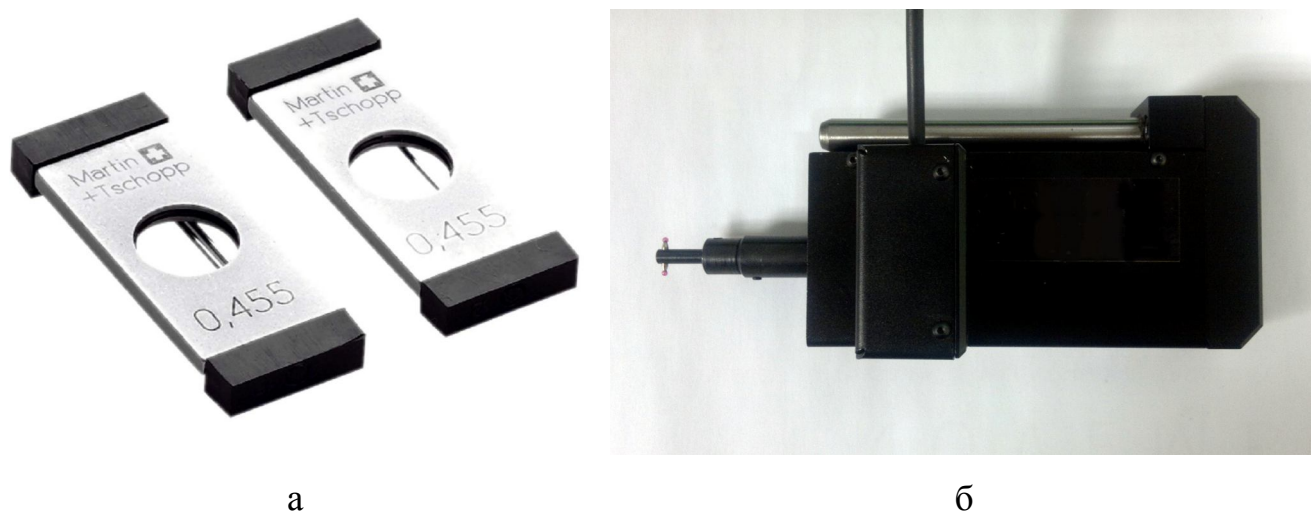
Описанные особенности позволяют получить высокие метрологические характеристики. В процессе измерений эталонных плоскопараллельных концевых мер длины на установке удалось достичь еще более низкой погрешности в пределах  $\pm 0,02$  мкм [32]. На мерах номинальной длиной до 100 мм было получено расхождение результатов измерений с ГЭТ 2-2010, не превышающее  $\pm 10$  нм. Несмотря на то, что данные результаты не имеют высокой повторяемости, их общее количество не позволяет приравнивать их к статистическим выбросам и, следовательно, можно говорить о потенциальной возможности повышения точности установки в перспективе.

### **2.2.1 Возможности применения установки в области метрологического обеспечения резьбовых соединений**

При наличии соответствующих технических приспособлений исследуемая установка и весь эталонный комплекс в целом успешно применяется для измерений среднего диаметра резьбовых калибров по методу трех проволок. К таким приспособлениям относятся: набор гладких измерительных цилиндрических проволок («Martin+Tschopp AG», Швейцария) для измерений среднего диаметра калибров-пробок (рисунок 2.7, а) и специальное приспособление со сменными Т-образными щупами со сферическими

наконечниками для измерений среднего диаметра калибров-колец («Trimos S.A.») (рисунок 2.7, б).

При этом состав приспособлений оптимизирован. В частности, перечень номинальных диаметров гладких цилиндрических проволочек для калибров метрической резьбы с углом профиля  $60^\circ$  сокращен по сравнению с рядом, предлагаемым по ГОСТ 2475-88 [33], но при этом номинальные диаметры проволочек полностью соответствуют рекомендуемым интервалам для каждого номинального шага по тому же нормативному документу.



а

б

а – гладкие цилиндрические проволочки;

б – приспособление с Т-образным щупом

Рисунок 2.7 – Приспособления для измерений среднего диаметра резьбовых калибров

### 2.2.2 Особенности измерения среднего диаметра резьбовых калибров на установке ВНИИМ

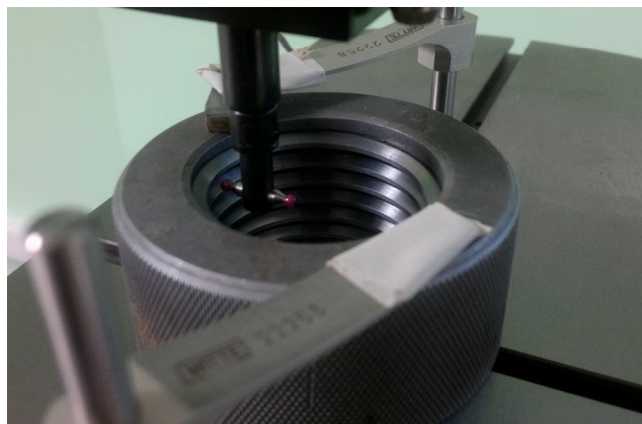
На установке средний диаметр резьбового калибра измеряется по методу трех проволочек, теория которого была изложена в главе 1. На рисунке 2.8 показана работа длиномера из состава установки при измерении среднего диаметра резьбовых калибров-пробок и калибров-колец с использованием

гладких цилиндрических проволочек и Т-образных щупов со сферическими наконечниками.

Рассмотрим подробнее реализацию данного метода с учетом технических особенностей горизонтального длиномера из состава установки.



а



б

Рисунок 2.8 – Измерение среднего диаметра резьбового калибра-пробки (а) и резьбового калибра-кольца (б) на установке ВНИИМ

### 2.2.2.1 Измерение среднего диаметра резьбового калибра-пробки

Перед началом измерений устанавливают измерительное усилие контактного щупа равное 3,00 Н. Приводят плоскопараллельные наконечники длиномера из состава установки в контакт и обнуляют показания. Затем снова разводят наконечники.

Измеряемый резьбовой калибр устанавливают и закрепляют на измерительном столе. При этом в зависимости от номинальных габаритных размеров калибра используют либо стандартный измерительный стол, либо специальный стол с центрами для горизонтальной установки калибра.

На плоскопараллельных наконечниках устанавливают гладкие измерительные проволочки. Конструктивно проволочки закреплены в специальных оправках, имеющих установочное отверстие, диаметр которого соответствует наружному диаметру наконечников длиномера, что упрощает

процесс установки.

Затем перемещают измерительную каретку до осуществления полного контакта обоих плоскопараллельных наконечников с проволочками с профилем калибра с противоположных сторон. При этом визуально следят, чтобы проволочки вошли в контакт с профилем калибра во впадинах резьбы.

С помощью регулировочных винтов находят положение измерительного стола, соответствующее минимальному измеренному значению  $M$  (рисунок 1.8), чтобы исключить возможность неточной установки калибра относительно оси измерения.

### **2.2.2.2 Измерение среднего диаметра резьбового калибра-кольца**

Для измерения среднего диаметра резьбового калибра-кольца на установке закрепляют специальный держатель для приспособления с Т-образным наконечником.

Резьбовой калибр устанавливают и закрепляют на измерительном столе.

С помощью команд в ПО установки приводят в контакт левый сферический наконечник щупа с профилем резьбы с левой стороны образующей калибра. Вводят в ПО предустановленное значение, соответствующее расстоянию между противоположными наиболее удаленными друг от друга точками сферических наконечников. Эта величина предварительно передается в ПО установки по результатам калибровки по гладкому измерительному кольцу с известным значением внутреннего диаметра (рисунок 2.9).





Рисунок 2.9 – Передача единицы длины от эталонного измерительного кольца

Затем приводят сферический наконечник щупа в контакт с профилем резьбы на противоположной стороне образующей калибра. При этом на этапе перемещения измерительной каретки смещают положение измерительного стола по вертикали на величину, равную половине номинального шага резьбы калибра. Это делается для того, чтобы контакт сферы и профиля резьбы произошел именно во впадине, а не по вершине.

Снимают показания, соответствующие размеру  $M$ .

Следует отметить, что в обоих случаях конструкция длиномера позволяет выполнить серию измерений среднего диаметра на каждом витке резьбы калибра. Это обеспечивается за счет механизма точного вертикального перемещения измерительного стола. Таким образом, можно получить более подробную информацию о среднем диаметре и о форме калибра на длине резьбы 50 мм, соответствующей вертикальному ходу измерительного стола.

## **2.3 Разработка и внедрение специализированного программного обеспечения для высокоточных измерений среднего диаметра резьбовых калибров**

### **2.3.1 Цели и задачи разработки**

Как было сказано выше, метод трех проволок, применяемый на установке ВНИИМ для измерений среднего диаметра резьбовых калибров, является косвенным. В связи с этим возникла необходимость разработки специализированного ПО для автоматизации процесса обработки результатов измерений.

С этой целью в рамках данной диссертационной работы создано ПО Thread Gages Calculation Software (TGCS). Основные требования, предъявленные к ПО на этапе формирования технического задания, следующие:

1) независимость разрабатываемого ПО от сторонних программных продуктов;

2) совместимость с оригинальным ПО, под управлением которого осуществляется работа измерительной системы горизонтального длиномера из состава установки;

3) соответствие системным требованиям персонального компьютера, которым оснащена установка;

4) простота и удобство интерфейса с точки зрения пользователей ПО и операторов установки и аналогичных средств измерений на базе горизонтальных длиномеров.

Результаты разработки и применения ПО описаны ниже.

## 2.3.2 Программное обеспечение Thread Gages Calculation Software

### 2.3.2.1 Графическая часть ПО

Графический интерфейс ПО TGCS реализован в виде набора диалоговых окон, которые отображаются последовательно при работе с ПО.

Пользователю предлагается следующий порядок действий:

1) выбор типа резьбы калибра (метрическая, трубная или трапецеидальная) (рисунок 2.10);



Рисунок 2.10 – Окно выбора типа резьбы

2) выбор типа калибра (пробка или кольцо) (рисунок 2.11);

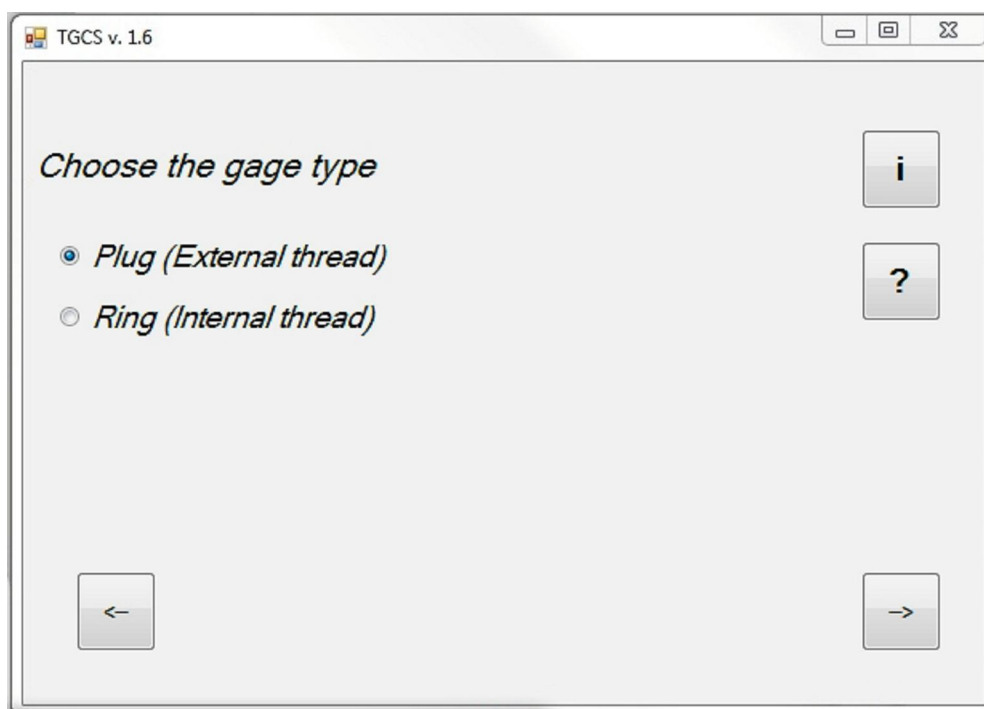


Рисунок 2.11 – Окно выбора типа калибра

3) выбор шага резьбы и диаметра проволоочки (для калибров-пробок) или сферического наконечника (для калибров-колец) из выпадающего списка (рисунок 2.12);

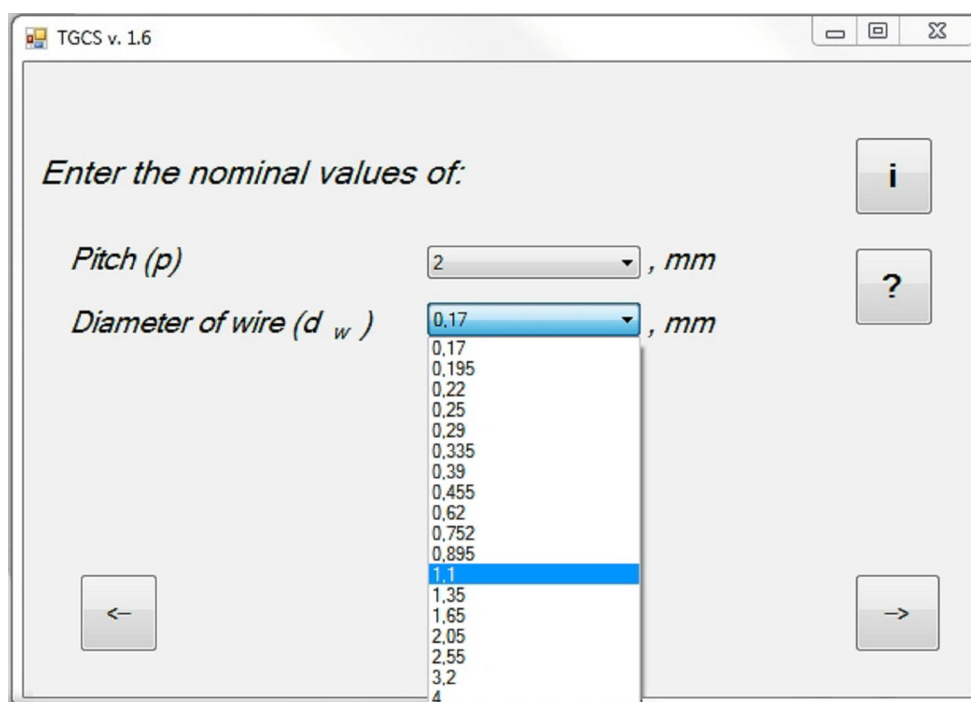


Рисунок 2.12 – Окно выбора шага резьбы и диаметра проволоочки

4) при работе на установке осуществляется измерение размера  $M$  (рисунок 1.8.). На следующем шаге работы ПО производится ввод измеренного значения  $M$  (рисунок 2.13) с последующим автоматическим расчетом величины среднего диаметра (рисунок 2.14).

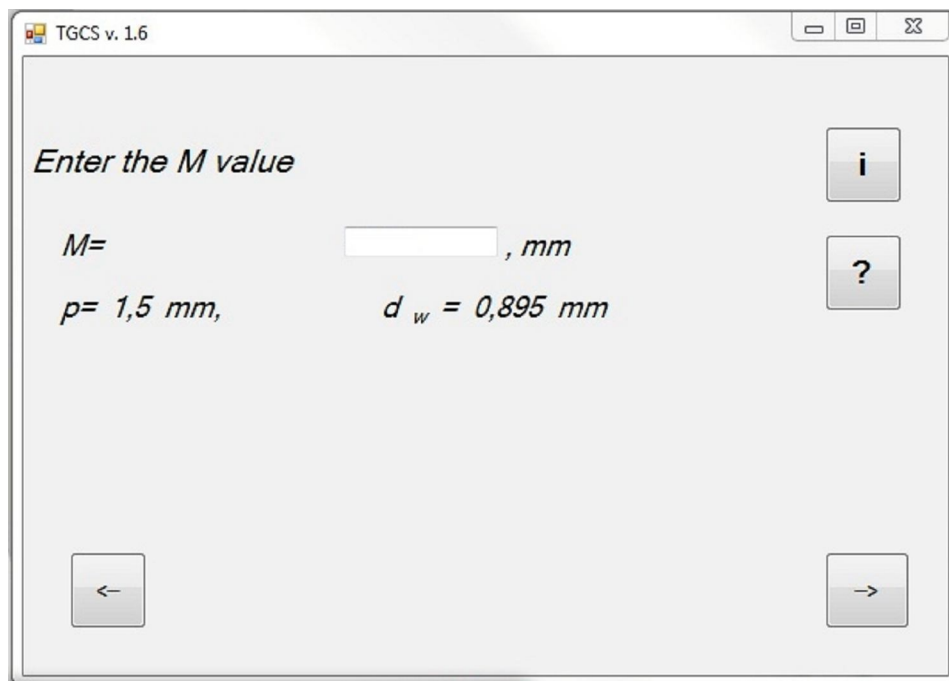


Рисунок 2.13 – Окно ввода измеренного значения размера  $M$

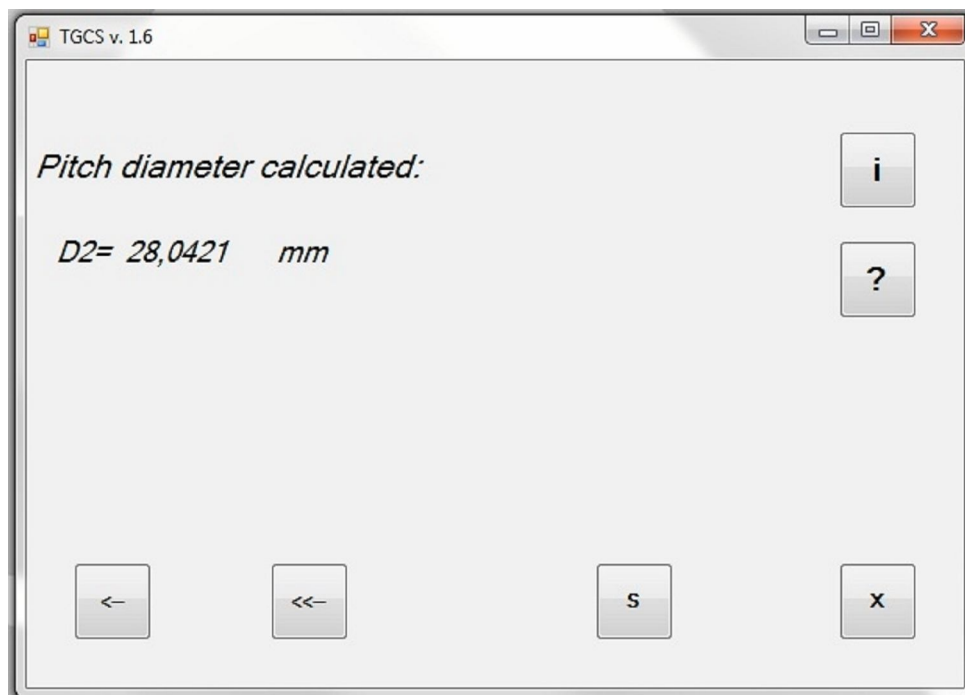


Рисунок 2.14 – Окно отображения величины среднего диаметра резьбового калибра

Полученное значение среднего диаметра может быть скопировано в буфер обмена и далее использовано на усмотрение пользователя, например, для формирования протокола измерений.

Описание функционального назначения кнопок в графическом интерфейсе ПО приведено в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Описание функций кнопок ПО TGCS

Вид кнопки	Служебное название	Функция
	«Next Step»	Переход к следующему диалоговому окну
	«Previous Step»	Переход к предыдущему диалоговому окну
	«Home»	Переход к первому диалоговому окну
	«Information»	Информация о ПО
	«Guide»	Справка о методе трех проволок
	«Send»	Копирование результата в буфер обмена (в версиях 1.6 и выше)
	«Exit»	Выход (завершение работы)

### 2.3.2.2 Технические особенности ПО

Область применения ПО 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. Это обусловлено тем, что калибры указанных типов имеют сходную конструкцию и, следовательно, расчет среднего диаметра для таких калибров осуществляется по одному алгоритму. В данном случае используются формулы для цилиндрической резьбы с симметричным профилем, в которые входят также номинальные величины шага резьбы и диаметра проволочек [34]. Фрагмент исходного кода программы на языке C#, содержащий основной математический аппарат, приведен в приложении Б.

Среди технических особенностей ПО TGCS можно выделить следующие [35].

ПО полностью автономно и не требует дополнительной установки на персональный компьютер каких-либо библиотек. ПО также не привязано к вычислительным приложениям или инструментам, встроенным, например, в разнообразные офисные пакеты.

ПО TGCS совместимо с 64-разрядной операционной системой Windows 7, т.к. в такой системе работает основное ПО, под управлением которого находятся основные функции горизонтального длиномера из состава установки.

Поскольку используемый в установке персональный компьютер имеет европейскую локализацию, интерфейс ПО TGCS был полностью реализован на английском языке, чтобы избежать возможных проблем с отображением кириллических сообщений. Кроме того, наличие англоязычного интерфейса повышает экспортный потенциал ПО.

Математическая часть ПО 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 AG» (Швейцария) и набора TEL75 фирмы «Trimos S.A.». Т.е. в ПО заложен перечень номинальных диаметров проволочек, фактически входящих в состав измерительного комплекса, а не просто расчетные значения из соответствующей нормативной документации. Кроме того, алгоритм ПО TGCS не предусматривает

ручной ввод значений шага резьбы и диаметра проволочек с клавиатуры, во избежание разночтений в результатах расчетов.

Одна из наиболее важных особенностей ПО TGCS – полная совместимость с оригинальным комплексом ПО, под управлением которого работает установка [36]. Величина  $M$ , полученная с помощью горизонтального длиномера, передается в диалоговое окно TGCS автоматически по нажатию специальной функциональной педали из комплекта и далее преобразуется в искомое значение среднего диаметра резьбового калибра (рисунок 2.15).

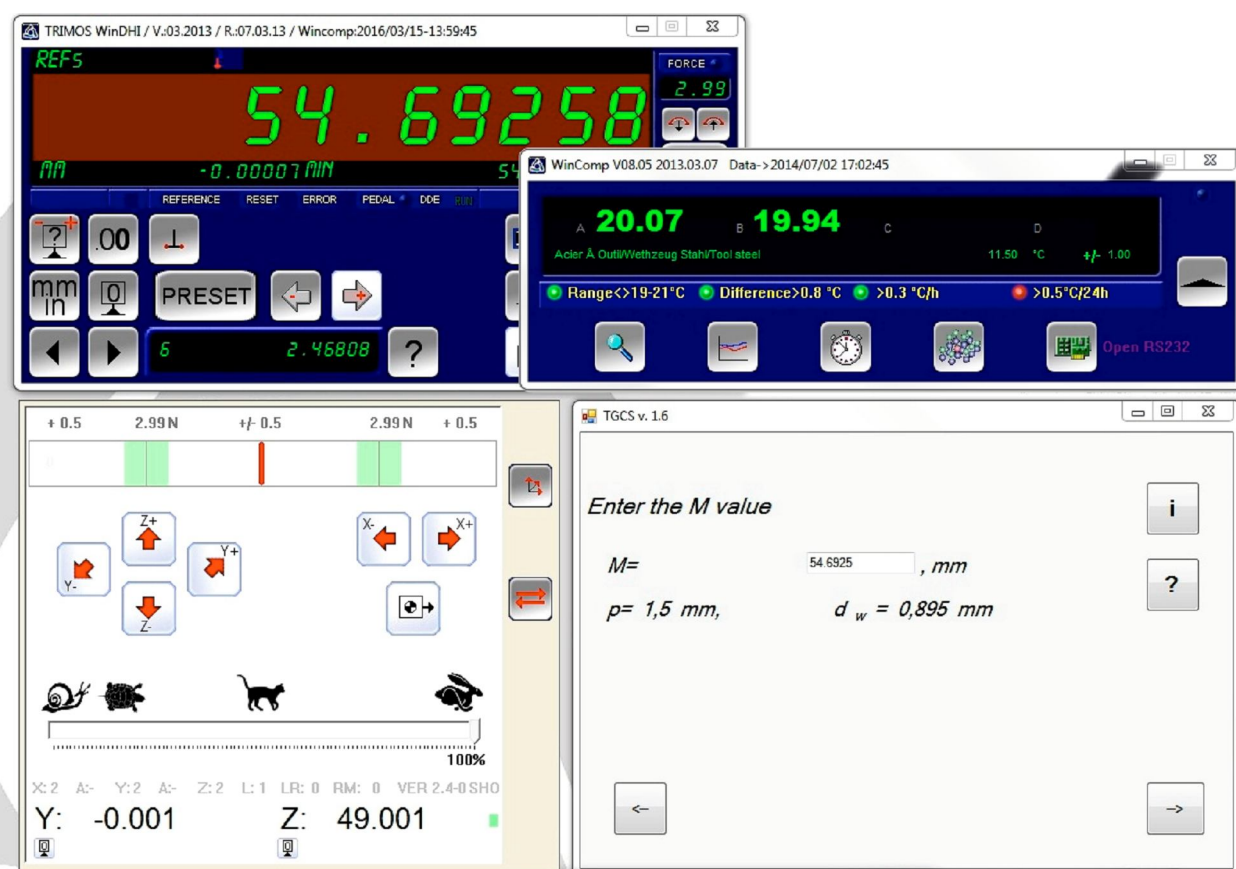


Рисунок 2.15 – Диалоговое окно TGCS совместно с ПО для управления измерениями и ПО системы температурной компенсации

Одна из задач, возникших на этапе отладки взаимодействия ПО TGCS с ПО для управления измерениями – разный формат десятичного разделителя. Как известно, в европейской культуре в качестве такого разделителя используется точка, а в отечественной традиции – запятая. Из-за указанного несоответствия ПО



TGCS некорректно воспринимало формат размера  $M$ , полученного с помощью основного ПО. В итоге было принято решение программно сделать TGCS нечувствительным к формату записи чисел с десятичным разделителем. Это позволило не только устранить проблему совместимости, но и сделать TGCS универсальной: значение  $M$  допускается вводить вручную в удобном формате и использовать ПО для автономных расчетов среднего диаметра резьбы в измерительных задачах, не связанных с эксплуатацией измерительного комплекса ВНИИМ.

Кроме того, интерфейс и звуковое сопровождение ПО TGCS реализованы в общей с основным ПО стилистике. Иными словами, ПО TGCS воспринимается функционально и визуально не как отдельная программа, а как дополнительный модуль к основному ПО установки.

### **2.3.2.3 Опыт применения ПО TGCS во ВНИИМ**

Первая тестовая версия TGCS, предназначенная для проверки работы вычислительной части, была запущена на установке ВНИИМ в декабре 2015 года. В мае 2016 года по результатам тестирования была собрана работающая версия, полностью удовлетворяющая техническому заданию, в частности, по совместимости с основным измерительным ПО. С этого времени все более поздние версии ПО TGCS успешно внедряются во ВНИИМ. В декабре 2016 года ПО 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 (приложение В). ПО также внесено в единый реестр российских программ для электронных вычислительных машин и баз данных (приказ Минкомсвязи России № 382 от 21.07.2017 г., регистрационный № 3772) (приложение Г).

С практической точки зрения использование ПО TGCS полностью исключает человеческий фактор из процесса обработки результатов измерений и

снижает трудоемкость при увеличении степени автоматизации измерений [36]. Стоит отметить, что согласно отчету о международных сличениях резьбовых калибров по теме EURAMET L-S21 причиной возникновения аномальных результатов измерений, предоставленных НМИ Финляндии (MIKES) [22], стало именно несоответствие вычислений, сделанных вручную, и с использованием ПО. Исследования ПО TGCS подтверждают отсутствие возможности такого несоответствия на практике.

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 (дрейфом нуля), что отражено в расчете бюджета погрешности, приведенном в главе 3.

## **Выводы к главе 2**

Установка ВНИИМ для измерений среднего диаметра резьбовых калибров является современной автоматизированной измерительной системой, не уступающей по своим метрологическим характеристикам лучшим мировым аналогам.

Использование рабочего эталона 3 разряда на базе ДИП совместно с установкой для измерений среднего диаметра позволяет осуществить прослеживаемость полного набора геометрических параметров резьбового калибра к эталонному комплексу.

Практика использования установки при определении среднего диаметра резьбовых калибров выявила ряд существенных преимуществ по сравнению с традиционными методами (сравнение с плоскопараллельной концевой мерой длины), а также с измерениями на КИМ.

Во-первых, более высокая точность. Суммарное СКО измерений среднего диаметра резьбовых калибров не превышает 0,2 мкм, а доверительные границы

суммарной погрешности не превышают  $\pm 0,5$  мкм. При этом расширенная неопределенность измерений среднего диаметра с использованием установки не превышает 0,5 мкм. Подробный анализ составляющих погрешности измерений представлен в следующей главе данной диссертационной работы.

Во-вторых, с практической точки зрения использование установки позволяет повысить скорость измерений резьбовых калибров при меньшей трудоемкости, а высокая степень автоматизации процесса снижает влияние человеческого фактора на результат измерений.

В рамках данной диссертационной работы разработано и внедрено специализированное ПО TGCS для обработки результатов косвенных измерений среднего диаметра резьбовых калибров. В ходе дальнейшего совершенствования установки планируется расширить возможности ПО TGCS с помощью интегрирования более функциональных инструментов статистической обработки результатов измерений, а также реализовать возможность формирования протокола измерений в среде ПО. Кроме того, в настоящее время во ВНИИМ разрабатывается метод измерений среднего диаметра конических резьбовых калибров с использованием установки. Математическое обеспечение метода также будет отражено в последующих версиях TGCS.

Особое внимание планируется уделить коммерческому потенциалу разработанного ПО. В настоящее время выпускается широкая номенклатура горизонтальных длиномеров от высокоточных до так называемых цеховых модификаций – аналогичных СИ более низкой точности для менее ответственных измерительных задач и менее стабильных условий эксплуатации. На данный момент только официальными представителями «Trimos S.A.» в России поставлено более сотни подобных горизонтальных длиномеров. Как правило, основные потребители – метрологические лаборатории и отделы технического контроля на различных производственных предприятиях. Здесь длиномеры производства «Trimos S.A.», «Mahr GmbH» и другие успешно заменяют советские горизонтальные оптиметры в рамках мероприятий по обновлению материальной базы. Поскольку в задачи подобных лабораторий часто входит контроль рабочих

резьбовых калибров, представляется возможным интерес к ПО TGCS среди владельцев горизонтальных длиномеров. Таким образом, распространение ПО TGCS может стать одним из перспективных направлений деятельности ВНИИМ.

Одно из наиболее перспективных направлений по совершенствованию комплекса – создание системы дистанционного управления измерениями. Речь идет главным образом об измерении эталонных измерительных колец и резьбовых калибров-колец, где весь цикл измерения можно осуществлять с помощью команд в ПО. Для этого предполагается продублировать весь управляющий интерфейс в помещении, смежном с установкой для измерений среднего диаметра.

При этом для контроля за ходом измерений будет использоваться система видео наблюдения, состоящая из трех камер: одна камера общего вида, и две камеры для контроля областей контакта щупа установки с противоположными сторонами образующей измерительного кольца или резьбового калибра.

Такая компоновка позволит исключить колебания температурного поля в окрестности установки, связанные с присутствием оператора. По предварительным оценкам, такое решение позволит снизить составляющую погрешности измерений, связанную с температурой, на (15-20) %.

### Глава 3. Теоретические и экспериментальные исследования погрешности измерений среднего диаметра резьбовых калибров с помощью высокоточного измерительного комплекса

#### 3.1 Составляющие погрешности измерений среднего диаметра резьбовых калибров с использованием установки для измерений среднего диаметра

Метрологические характеристики установки могут быть даны на основе анализа ее конструкции, метода измерения и оценки точности всех вспомогательных средств, участвующих в процессе измерения путем определения суммарной погрешности результата измерения на основе оценки отдельных составляющих.

Схема установки в виде основных структурных элементов, поясняющая формирование погрешности измерений, представлена на рисунке 3.1.

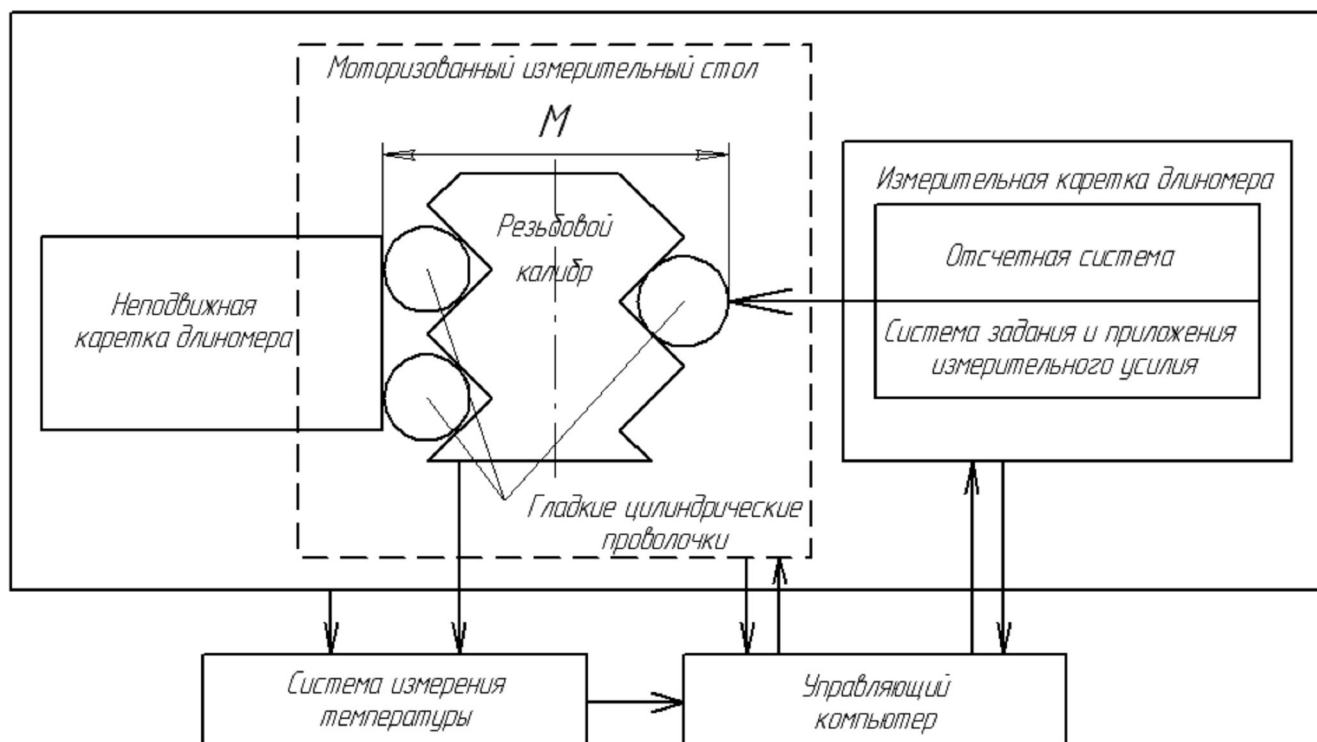


Рисунок 3.1 – Структурная схема установки для измерений среднего диаметра резьбовых калибров

Погрешности, в зависимости от источников и характера проявления, делятся на случайные и систематические.

Систематические погрешности возникают под воздействием постоянных и закономерно изменяющихся факторов, которые остаются одинаковыми при повторных измерениях. По источникам происхождения систематические погрешности обуславливаются свойствами и конструкцией установки (инструментальные погрешности), отклонениями условий измерений от нормальных, погрешностью метода. Систематические погрешности вызывают смещение результата измерений, поэтому необходимо выявлять источники их возникновения и по возможности устранять их, в частности, за счет введения поправок.

Оценку неисключенной систематической погрешности (НСП) находят на основании экспериментальных данных исследований установки, анализа погрешностей метода и погрешностей от действия влияющих величин. НСП выражается доверительными границами  $\pm\theta(P)$  при числе составляющих более трех.

Случайные погрешности появляются нерегулярно и изменяются случайным образом при повторных измерениях.

Оценку случайной погрешности находят на основании экспериментальных данных, полученных при исследовании установки, и на основе анализа влияющих величин. Случайная погрешность характеризуется среднеквадратическим отклонением (СКО) результатов измерений  $S$  с указанием числа независимых наблюдений.

Оценка погрешности передачи единицы должна включать в себя как НСП, так и случайные погрешности метода и средств передачи. Погрешность передачи единицы характеризуется указанием СКО результата измерений  $S_{\Sigma}$ , обусловленного влиянием случайных погрешностей и НСП метода и средств измерений.

Средний диаметр резьбы метрического калибра-пробки по измеренному значению  $M$  (рисунок 1.8) определяется по формуле

$$d_2 = M + K_1 \cdot p - K_2 \cdot d_{II}, \quad (3.1)$$

где  $p$  – номинальный шаг резьбы, мм;

$d_{II}$  – номинальный диаметр используемых проволочек, мм;

$K_1, K_2$  – коэффициенты, зависящие от номинального угла профиля резьбы;

$M$  – размер, измеряемый с помощью высокоточной установки ВНИИМ, мм.

Поскольку измеряемой величиной является в данном случае только  $M$ , погрешность измерений среднего диаметра резьбовых калибров на установке ВНИИМ будет характеризоваться только погрешностью измерений  $M$ .

Измеряемую величину  $M$  в общем случае можно представить в виде

$$M = f(X_1, \dots, X_m), \quad (3.2)$$

где  $X_1, \dots, X_m$  – входные величины (непосредственно измеряемые или другие величины, влияющие на результат измерения) [37].

Математическая модель измеряемой величины (уравнение измерений), может быть выражена в следующем виде

$$M = N + \Delta t_m \alpha D + C_a + C_z + C_e + C_v + C_f + C_w + C_N \quad (3.3)$$

где  $N$  – отсчет по шкале установки, мм;

$\Delta t_m$  – отклонение температуры калибра от нормальной, °С;

$\alpha$  – ТКЛР материала калибра, К<sup>-1</sup>;

$D$  – номинальный диаметр калибра, мм;

$C_a$  – поправка, связанная с погрешностью совмещения калибра с измерительной осью установки, мм;

$C_z$  – поправка на дрейф нуля установки, мм;

$C_e$  – поправка, зависящая от инструментальной погрешности установки, мм;

$C_v$  – поправка, связанная с погрешностями установки калибра на измерительном столе, а также погрешностью установки проволочек и сферических наконечников во впадинах резьбы калибра, мм;

$C_f$  – поправка, связанная с погрешностью задания и приложения измерительного усилия, мм;

$C_w$  – поправка, связанная с погрешностью определения диаметра проволок или расстояния между сферическими наконечниками Т-образного щупа, мм;

$C_N$  – поправка, связанная с погрешностью отсчета по измерительной шкале установки, мм.

Все составляющие погрешности разделим по признаку зависимости от величины измеряемого диаметра. Затем опишем каждую составляющую подробно с указанием типа.

Итак, составляющие, зависящие от величины диаметра, это:

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

Составляющие погрешности, независящие от величины диаметра калибра:

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

### **3.1.1 Погрешность измерений, связанная с температурой окружающей среды и температурным коэффициентом линейного расширения измеряемого калибра**

Везде, где идет речь о геометрических измерениях высокой точности, температура является одной из основных характеристик условий проведения



измерений. Связано это с тем, что геометрические размеры большинства объектов измерений могут быть разными в разных условиях. Классические постулаты об увеличении объемов твердых тел с увеличением их температуры известны из традиционной физики. К примеру, металлы при изменении температуры меняют свои линейные размеры пропорционально температурному коэффициенту линейного расширения (ТКЛР) – физической величине, характеризующей процесс.

В такой ситуации любой результат измерений будет иметь смысл только при наличии данных о температуре, при которой этот результат был получен.

С практической точки зрения интерес представляет не абсолютное значение температуры, а величина ее отклонения от нормальной [38]. Именно это отклонение вносит вклад в изменение геометрических параметров измеряемого объекта через ТКЛР. Для точного приведения результатов измерений к нормальным условиям, необходима информация как о температуре, так и о ТКЛР материала измеряемого объекта.

### **3.1.1.1 Высокоточная система температурной компенсации**

С целью измерения температуры и учета ее влияния на результаты измерений, в установке предусмотрена система температурной компенсации. В основе системы – два термоэлектрических датчика температуры ALMEMO Pt100 (фирма «ANLBORN Mess- und Regelungstechnik GmbH», Германия) [39].

Оба датчика конструктивно являются накладными платиновыми терморезисторами, один из которых закреплен в корпусе основания длиномера из состава установки (датчик В), а другой закрепляется на измеряемом объекте (датчик А) (рисунок 3.2).

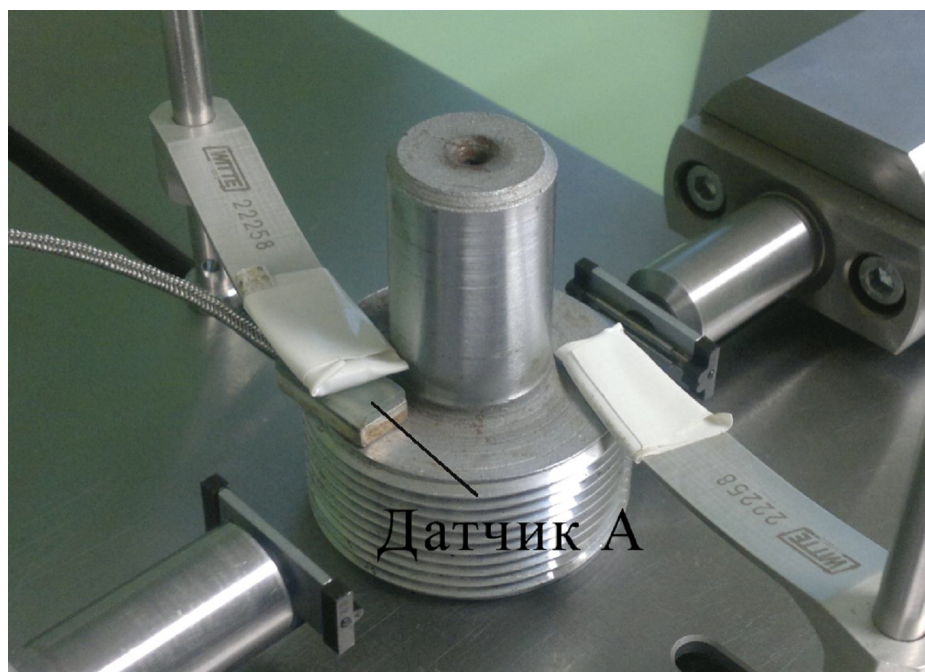


Рисунок 3.2 – Датчик системы температурной компенсации

Показания обоих датчиков в реальном времени отображаются в отдельном окне соответствующего ПО (рисунок 3.3), а поправки, связанные с отклонением температуры от нормальной, автоматически вносятся в результат измерений.



Рисунок 3.3 – Окно ПО системы температурной компенсации

ПО системы температурной компенсации позволяет производить оценку динамики изменения температуры по каждому из датчиков с помощью инструментов графической визуализации. Кроме того, ПО автоматически заносит показания температуры в протокол через равные интервалы времени, что позволяет получить более полную характеристику динамического процесса.

Также в ПО предусмотрена возможность задания величины ТКЛР материала измеряемого объекта для каждой измерительной задачи.

Погрешность при приведении результатов измерений среднего диаметра калибра к нормальным условиям будет обусловлена погрешностью измерений отклонения температуры калибра от нормальной ( $\Delta t_m$ ). Обозначим соответствующую поправку через  $C_{t_m}$ . Если НСП  $t_m$  задана границами  $\Theta_{t_m}$ , то границы НСП при вычислении поправки  $C_{t_m}$  будут равны

$$\Theta_{C_{t_m}} = \frac{\partial C_{t_m}}{\partial t_m} \cdot \Theta_{t_m} = \alpha \cdot D \cdot \Theta_{t_m}. \quad (3.4)$$

В таблице 3.1 даны результаты исследования абсолютной погрешности измерений температурных датчиков в окрестности 20 °С. Исследования выполнялись с использованием калиброванного термометра цифрового, с прослеживаемостью результатов измерений к Государственному первичному эталону единицы температуры ГЭТ 34-2007.

Таблица 3.1 – Исследование температурных датчиков

Показания температурных датчиков, °С		Абсолютная погрешность измерений температуры, °С	
А	В	А	В
19,998	19,995	+0,006	+0,007
20,001	19,995	+0,007	+0,007
20,001	19,996	+0,006	+0,007
20,002	19,996	+0,008	+0,008
20,004	19,997	+0,011	+0,008
20,005	19,997	+0,017	+0,008
20,005	19,997	+0,013	+0,007
20,006	19,997	+0,012	+0,008
20,007	19,998	+0,012	+0,009
20,007	19,998	+0,012	+0,009

Кроме того, точность, с которой можно определить ТКЛР стали, составляет  $0,5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  [40].

ТКЛР материала калибров – углеродистой стали – равен  $11,5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ . Границы НСП при измерении температуры калибра, вызванной градиентом температуры и погрешностью температурных датчиков,  $\Theta_{t_m} = 0,02 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Таким образом, границы НСП определения поправки  $C_{tm}$  составляют

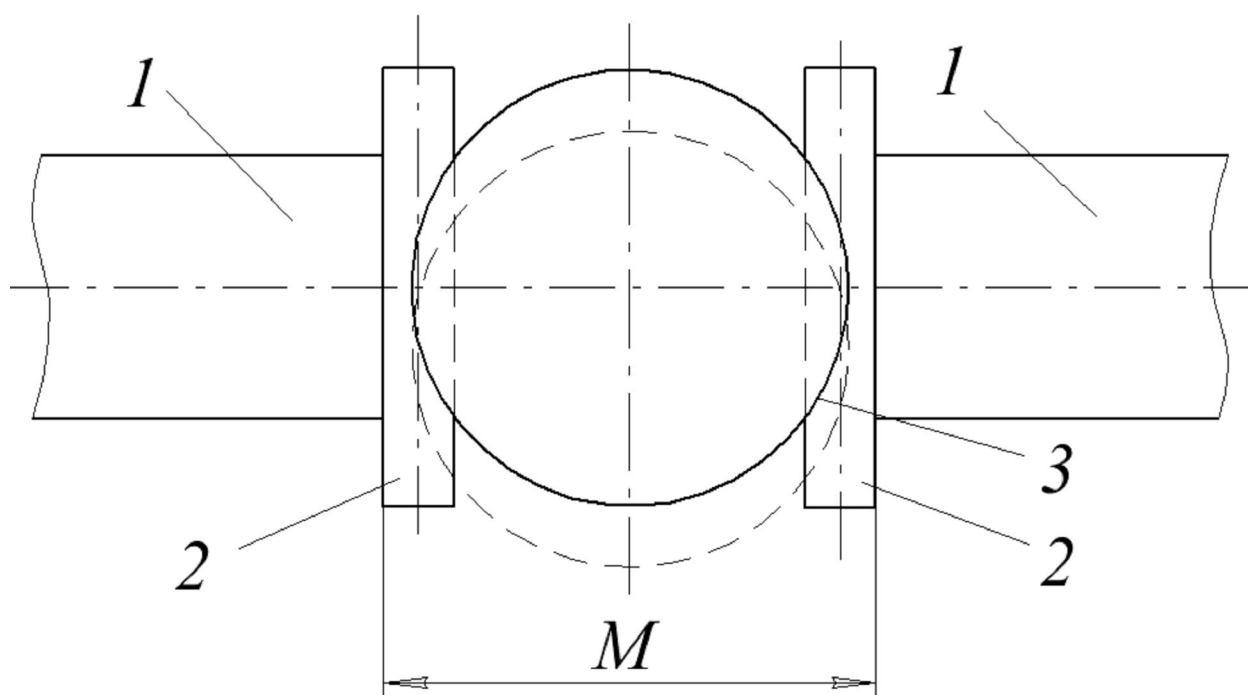
$$\Theta_{C_{tm}} = 0,23 \cdot 10^{-3} \cdot D, \quad (3.5)$$

где  $D$  – измеряемый диаметр, мм.

### **3.1.2 Погрешность, связанная с ошибкой совмещения диаметра калибра с осью измерения**

В данном вопросе основная сложность связана с тем, что резьбовой калибр представляет собой цилиндр, а, следовательно, диаметром калибра в общем случае может считаться только тот отрезок прямой, который ограничен пересечением с образующей цилиндра в двух наиболее удаленных от центра точках. Полностью совместить этот отрезок с измерительной осью невозможно.

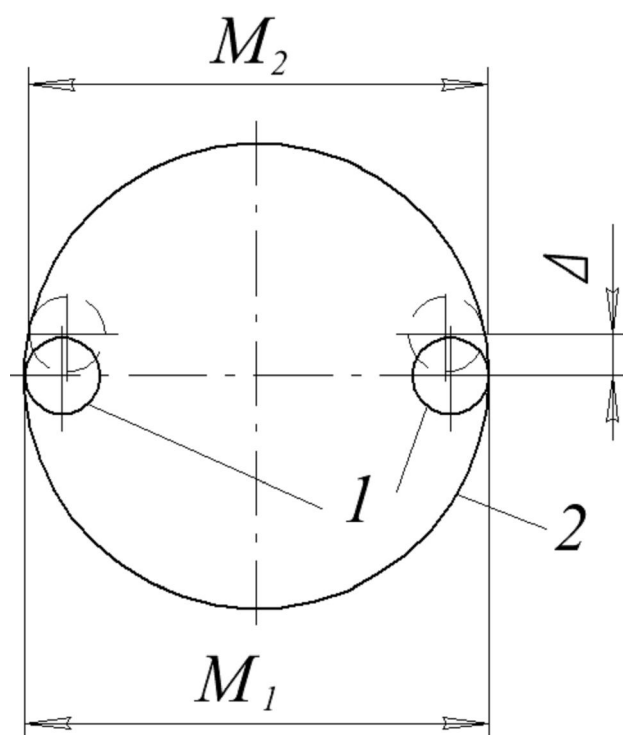
На практике точность позиционирования резьбового калибра относительно измерительной оси имеет принципиальное значение только для калибров-колец. При измерении калибров-пробок касание проволочек с поверхностью плоскопараллельных щупов длиномера происходит по линии, следовательно, при величине отклонения положения калибра порядка диаметра плоскопараллельных наконечников длиномера измеряемый размер фактически не меняется (рисунок 3.4). Положение резьбового калибра-пробки при смещении относительно оси измерений на рисунке обозначено пунктирной линией.



1 – плоскопараллельные наконечники установки, 2 – цилиндрические проволочки, 3 – образующая цилиндра калибра-пробки (наружный диаметр)

Рисунок 3.4 – Взаимное расположение цилиндрических проволочек и оси калибра при измерении среднего диаметра

При измерении среднего диаметра калибра пробки цилиндрические проволочки заменяются на Т-образный щуп, имеющий сферические наконечники. В процессе измерений контакт наконечника с образующей цилиндра теоретически осуществляется в одной точке (рисунок 3.5), а, следовательно, при смещении оси калибра относительно оси измерения на величину  $\Delta$  возникает ошибка в определении внутреннего диаметра. Как видно из рисунка, измеряемые размеры  $M_1$  и  $M_2$  не равны. Положение сферических наконечников Т-образного щупа при смещении относительно оси измерений на рисунке обозначено пунктирной линией.



1 – сферические наконечники Т-образного щупа, 2 – образующая цилиндра калибра-кольца (внутренний диаметр)

Рисунок 3.5 – Изменение величины измеряемого диаметра при смещении контактного сферического наконечника щупа

Рассчитаем величину возникающей в данном случае ошибки.

Рассмотрим треугольник  $OAB$  на рисунке 3.6.

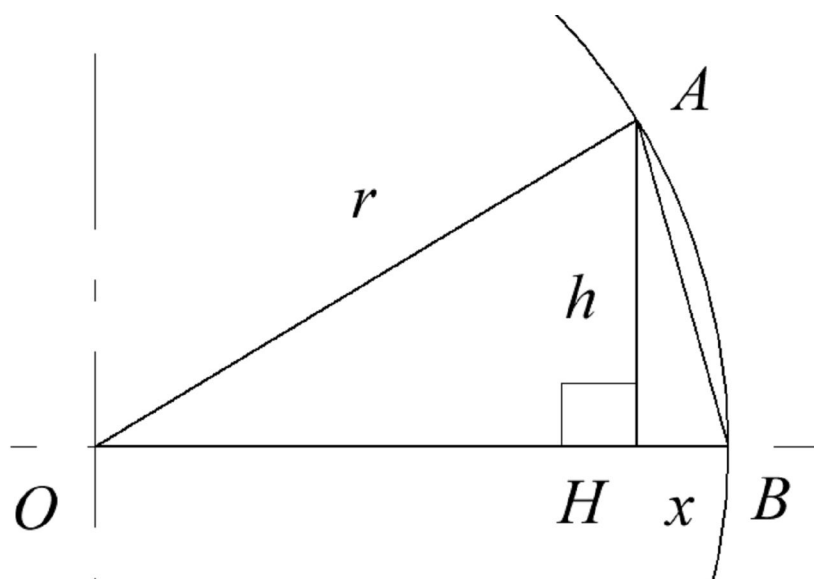


Рисунок 3.6 – Ошибка совмещения диаметра калибра-кольца с осью измерения

Здесь  $OB$  – радиус калибра, лежащий на оси измерений установки, при этом контакт сферического наконечника Т-образного щупа с образующей калибра осуществляется в точке  $B$ . При несовпадении диаметра калибра с осью измерений аналогичный контакт осуществляется в точке  $A$ . Величина смещения соответствует высоте треугольника  $AH$ , а величина измеренного радиуса калибра будет отличаться от теоретической на величину  $HB$ . Соответственно, ошибка в измерении диаметра (или размера  $M$ ) при этом будет составлять  $2 \times HB$ .

Величина поправки  $C_a$  (формула 3.3) соответствует  $HB$ . Обозначим искомую величину через  $x$ , высоту треугольника  $AH$  через  $h$ , кроме того, введем обозначение  $OA=OB=r$ .

В треугольнике  $OAB$

$$AH^2 + OH^2 = OA^2.$$

С учетом принятых обозначений

$$h^2 + (r - x)^2 = r^2,$$

$$h^2 + r^2 - 2rx + x^2 = r^2,$$

$$x^2 - 2rx + h^2 = 0,$$

отсюда корни квадратного уравнения  $x_{1,2}$  будут равны

$$x_{1,2} = \frac{2r \pm \sqrt{4r^2 - 4h^2}}{2} = r \pm \sqrt{r^2 - h^2}.$$

Поскольку должно выполняться логичное условие, при котором  $x=0$ , если  $h=0$ , из двух корней квадратного уравнения действительности соответствует только

$$x = r - \sqrt{r^2 - h^2}. \quad (3.6)$$

Из этой формулы становится очевидно, что при одной и той же величине смещения  $h$  величины  $x$  будут меньше для больших диаметров. То есть погрешность совмещения осей калибра и длиномера, обратно пропорциональна измеряемому диаметру.

Позиционирование резьбового калибра относительно измерительной оси установки осуществляется в автоматическом режиме с помощью установленных в измерительном столе приводов. Дискретность позиционирования 1 мкм. Погрешность позиционирования стола измерялась с использованием прибора для поверки концевых мер длины (прибор) из состава государственного рабочего эталона 2 разряда единицы длины в диапазоне от 0,01 до 2000 мкм (регистрационный № 3.1.ZZB.0191.2015) (рисунок 3.7).



1 – электронный блок прибора, 2 – контактный щуп прибора

Рисунок 3.7 – Исследование установки с использованием государственного рабочего эталона 2 разряда единицы длины в диапазоне от 0,01 до 2000 мкм

В таблице 3.2 представлены результаты определения погрешности позиционирования измерительного стола на разных участках с шагом 5 мм на величине хода в горизонтальной плоскости 50 мм. Абсолютная погрешность определялась как разность показаний ПО установки и прибора для поверки концевых мер длины.



Таблица 3.2 – Результаты определения погрешности позиционирования измерительного стола

Участок хода измери- тельного стола, мм	Абсолютная погрешность позиционирования измерительного стола, мкм									
	Номер измерения									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
5	+0,32	+0,30	+0,37	+0,31	+0,29	+0,38	+0,32	+0,29	+0,35	+0,37
10	+0,45	+0,40	+0,41	+0,43	+0,45	+0,39	+0,40	+0,41	+0,45	+0,47
15	+0,12	+0,13	+0,17	+0,09	+0,15	+0,12	+0,11	+0,11	+0,12	+0,15
20	+0,42	+0,40	+0,42	+0,45	+0,49	+0,40	+0,39	+0,42	+0,41	+0,45
25	+0,25	+0,27	+0,25	+0,23	+0,20	+0,25	+0,21	+0,25	+0,20	+0,23
30	+0,43	+0,45	+0,41	+0,43	+0,40	+0,42	+0,45	+0,41	+0,40	+0,43
35	+0,31	+0,31	+0,27	+0,32	+0,30	+0,31	+0,29	+0,35	+0,32	+0,30
40	+0,27	+0,25	+0,23	+0,22	+0,27	+0,21	+0,26	+0,27	+0,20	+0,25
45	+0,34	+0,35	+0,37	+0,34	+0,37	+0,31	+0,30	+0,32	+0,34	+0,36
50	+0,37	+0,32	+0,33	+0,37	+0,35	+0,31	+0,34	+0,31	+0,37	+0,32

По результатам исследований погрешность позиционирования измерительного стола не превышает 0,5 мкм (без учета знака).

Как было показано ранее, влияние неточности позиционирования калибра уменьшается с увеличением измеряемого диаметра. То есть, наибольшая по величине погрешность, связанная с данной составляющей, при прочих равных условиях может возникнуть на нижней границе диапазона измерений. Для резьбового калибра метрической резьбы М3 средний диаметр имеет порядок 3 мм, т.е.  $r=1,5$  мм. Таким образом, с учетом принятых обозначений, при  $h=0,0005$  мм получим величину границ НСП при вычислении поправки  $C_a$

$$\Theta_{C_a} = 1,5 - \sqrt{1,5^2 - 0,0005^2} = 1,5 - 1,49999992 = 0,8 \cdot 10^{-4} \text{ мкм.}$$

### 3.1.3 Погрешность определения действительного диаметра проволок

Средний диаметр резьбы метрического калибра-пробки по измеренному значению  $M$  определяется по формуле 3.1, которая с учетом коэффициентов для угла профиля  $60^\circ$  имеет вид

$$d_2 = M + 0,866 \cdot p - 3 \cdot d_{II}. \quad (3.7)$$

Шаг и диаметр проволоочки – это табличные значения. При этом в выражении среднего диаметра резьбы исходят из равенства диаметров каждой из трех используемых проволочек. На практике это не так. Каждая проволочка фактически имеет диаметр, отличный от математического предпочтительного размера, и отличный, собственно, от диаметров двух других проволочек из комплекта. Действительные диаметры проволочек рекомендуется учитывать с помощью введения соответствующей поправки [34]

$$d_2 = M + 0,866 \cdot p - 3 \cdot d_{II} + C_1, \quad (3.8)$$

где

$$C_1 = 0,5 \cdot \left( 1 + \frac{1}{\sin \frac{\alpha}{2}} \right) \cdot \left( \Delta d_{II1} + \frac{\Delta d_{II2} + \Delta d_{II3}}{2} \right). \quad (3.9)$$

Здесь:  $\alpha$  – номинальный угол профиля резьбы калибра, градус;

$\Delta d_{II1}, \Delta d_{II2}, \Delta d_{II3}$  – отклонения диаметров проволочек от номинальных значений (с учетом знака), мм.

Таким образом, действительные значения диаметров проволочек влияют на результат измерения среднего диаметра через входную величину  $C_1$ . Диаметр проволочки  $d_{II}$  можно измерить также с использованием установки с погрешностью не выше  $\pm 0,05$  мкм (таблица 3.3).

Таблица 3.3 – Результаты измерений диаметров проволочек из состава установки

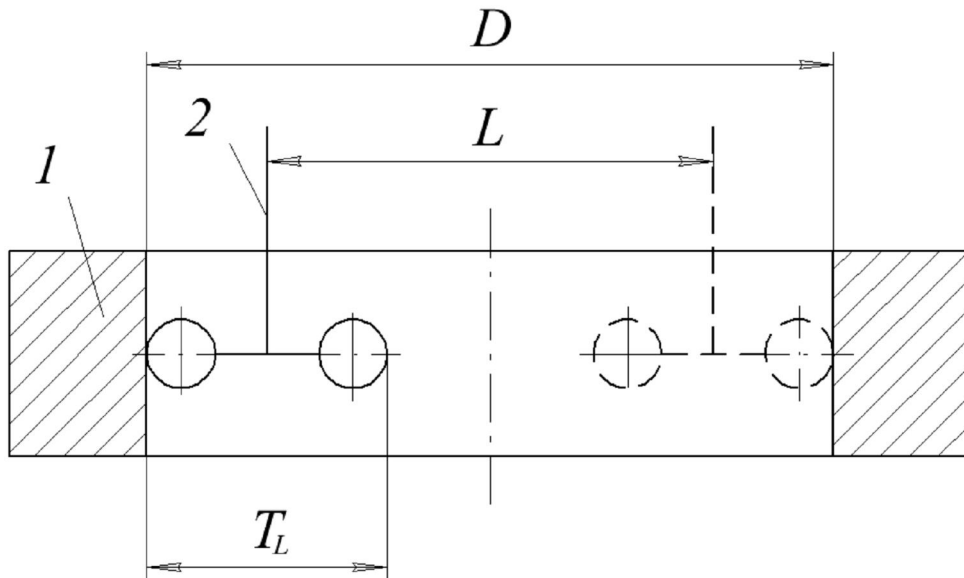
Номинальный диаметр проволочки, мм	Абсолютная погрешность измерений диаметра проволочки, мкм		
	0,170	+0,042	+0,045
0,195	+0,043	+0,039	+0,040
0,220	+0,045	+0,042	+0,040
0,250	+0,042	+0,047	+0,045
0,290	+0,048	+0,045	+0,041
0,335	+0,050	+0,049	+0,047
0,390	+0,047	+0,046	+0,049
0,455	+0,049	+0,050	+0,042
0,620	+0,045	+0,043	+0,041
0,725	-0,048	-0,045	-0,042
0,895	+0,049	+0,047	+0,049
1,100	+0,047	+0,042	+0,040
1,350	-0,050	-0,039	-0,041
1,650	-0,048	-0,046	-0,043
2,050	+0,041	+0,042	+0,044
2,550	-0,050	-0,048	-0,047
3,200	-0,050	-0,049	-0,043
4,000	-0,052	-0,052	-0,051

Действительный размер проволочки определялся как среднее арифметическое из двух измерений, проведенных в среднем сечении в двух взаимно перпендикулярных направлениях рабочей части проволочки [41].

Границы НСП при вычислении поправки  $C_w$  от набора из трех проволочек будут соответствовать

$$\Theta_{C_w} = 0,05 \cdot \sqrt{3} = 0,08 \text{ мкм.}$$

При измерении среднего диаметра калибров-колец возникает аналогичная погрешность, связанная с отклонением диаметров сферических наконечников T-образного щупа. При этом имеет смысл говорить не о самих отклонениях диаметров сфер, а о погрешности определения так называемой константы щупа  $T_L$  (рисунок 3.8), в которую уже входят величины этих диаметров.



1 – измерительное кольцо, 2 – T-образный щуп со сферическими наконечниками

Рисунок 3.8 – Схема определения константы щупа

Для определения константы щупа  $T_L$  используют кольцо измерительное с известным значением внутреннего диаметра  $D$ , полученным от лазерной интерференционной установки ЛИУ-200 из состава государственного вторичного эталона единицы длины – метра в диапазоне 0,5 – 200 мм (№ 2.1.ZZB.0027.2013) [42, 43]. Из схемы на рисунке 3.7 видно, что константа щупа вычисляется, как разность известного внутреннего диаметра кольца и величины перемещения щупа между противоположными сторонами образующей кольца  $L$ , полученной с помощью установки.

$$T_L = D - L . \quad (3.10)$$

В таблице 3.4 приведены результаты измерений константы щупа для щупов с разными номинальными диаметрами сферических наконечников.

Таблица 3.4 – Результаты измерений константы щупа для Т-образных щупов с разными номинальными диаметрами сферических наконечников

Номинальный диаметр сферического наконечника Т-образного щупа, мм	Результаты измерений константы щупа $T_L$ , мм
0,445	2,51052; 2,51055; 2,51057; 2,51053; 2,51051
0,620	4,09023; 4,09025; 4,09027; 4,09024; 4,09027
0,725	5,01277; 5,01275; 5,01276; 5,01273; 5,01274
0,895	6,04925; 6,04921; 6,04924; 6,04920; 6,04924
1,100	8,02031; 8,02035; 8,02037; 8,02038; 8,02034
1,350	10,02149; 10,02144; 10,02143; 10,02144; 10,02148
1,650	12,00473; 12,00471; 12,00470; 12,00475; 12,00477
2,050	13,01941; 13,01940; 13,01948; 13,01947; 13,01945
2,550	16,00482; 16,00487; 16,00488; 16,00483; 16,00481
3,200	20,00713; 20,00715; 20,00717; 20,00713; 20,00712
4,000	25,04136; 25,04135; 25,04130; 25,04132; 25,04133

Границы НСП определения поправки  $C_w$  для этого случая не превышают, по результатам исследований, 0,1 мкм.

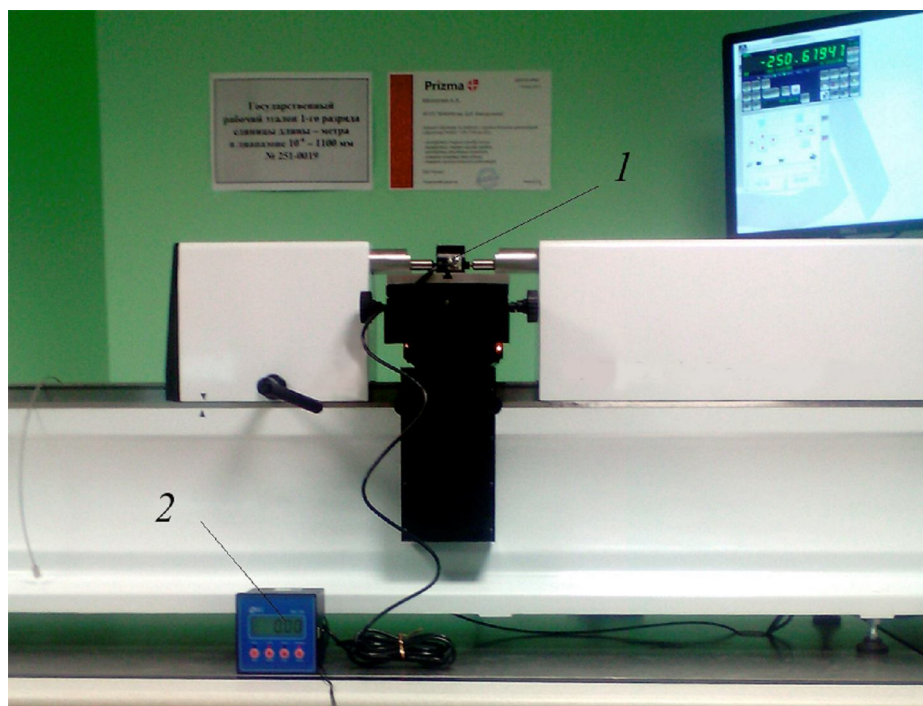
### **3.1.4 Погрешность, связанная с неоднозначностью приложения измерительного усилия**

Одним из факторов, влияющих на точность контактных измерений, является измерительное усилие. В случае измерений среднего диаметра резьбового калибра методом трех проволок имеет место контакт плоскопараллельных измерительных щупов длиномера с образующими проволок. Следовательно, при каждом таком контакте возникают различные эффекты (деформация проволок и щупов, механические напряжения),

способные повлиять на результат измерений. Особенно сильно такие эффекты сказываются при использовании ручного инструмента, так как, очевидно, каждый оператор в каждом отдельном измерении осуществляет контакт измерительных поверхностей инструмента и измеряемого объекта по-разному. Таким же образом возникает погрешность и при использовании горизонтальных длиномеров с ручной подачей измерительной каретки.

В длиномере из состава установки ВНИИМ неоднозначность установки измерительного усилия снижена за счет использования автоматизированной системы задания и приложения измерительного усилия. Таким образом, при установке системы на ноль и при измерении приложенное измерительное усилие остается одинаковым, что минимизирует соответствующую составляющую погрешности.

Исследования вклада в результат измерений погрешности установки измерительного усилия проводились с использованием датчика силоизмерительного тензорезисторного UMI-K5 (рисунок 3.9).



1 – чувствительный элемент датчика, 2 – электронный блок датчика

Рисунок 3.9 – Проверка измерительного усилия длиномера

Погрешность задания измерительного усилия на установке составляет  $\pm 0,02$  Н. При этом погрешность силоизмерительного датчика при измеряемом усилии в 3,00 Н составляет  $\pm 0,0072$  Н по результатам, полученным при калибровке датчика.

В таблице 3.5 приведены отклонения показаний длиномера при различных измерительных усилиях в диапазоне (2,98-3,02) Н.

Таблица 3.5 – Показания длиномера при различных измерительных усилиях

Номинальное измерительное усилие, Н	Отклонения показаний длиномера, мкм
2,98	0,02; 0,02; 0,05; 0,03; 0,02
2,99	0,01; 0,03; 0,02; 0,04; 0,04
3,01	0,07; 0,06; 0,06; 0,04; 0,05
3,02	0,05; 0,03; 0,04; 0,04; 0,06

Исследования показывают, что при НСП измерительного усилия 0,02 Н границы НСП при определении поправки  $C_f$  составляют порядка 0,1 мкм. При этом данную составляющую целесообразно учитывать с коэффициентом  $\sqrt{2}$ , т.к. контактные эффекты, вызванные приложением измерительного усилия, возникают в двух точках, принадлежащих диаметру резьбового калибра

$$\Theta_{C_f} = 0,1 \cdot \sqrt{2} = 0,14 \text{ мкм.}$$

Данная составляющая имеет принципиальное значение в большей степени при измерении калибров-пробок. В случае с калибрами-кольцами используется Т-образный щуп, который устанавливается в патрон. Конструкция патрона предусматривает приложение к сферическим наконечникам щупа усилия не более 0,5 Н, что делает возникающие при контакте напряжения и деформации, и соответствующую поправку, пренебрежимо малыми.

### 3.1.5 Погрешность, связанная с неточностью установки калибра на измерительном столе

Схема возникновения данной погрешности аналогична описанной в п. 3.2.2.

Перед вводом установки в эксплуатацию была осуществлена настройка пневматических опор виброзащитного стола с использованием Государственного рабочего эталона 2 разряда единицы длины в области измерений отклонений от прямолинейности и плоскостности в диапазоне значений от -2500 мкм до +2500 мкм на длине поверяемой поверхности 1 м (рисунок 3.10).

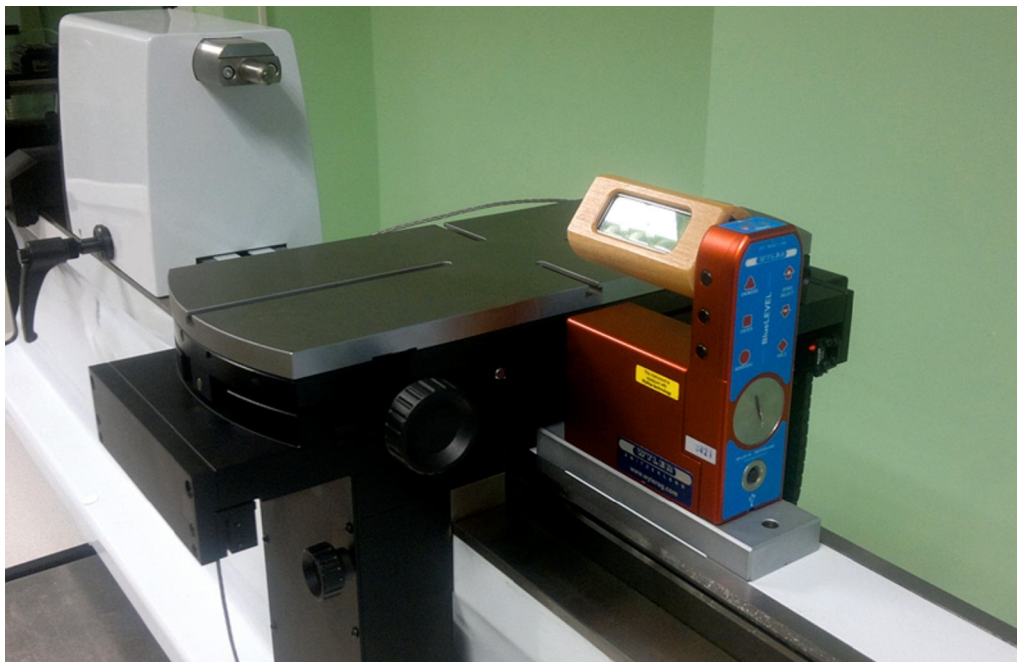
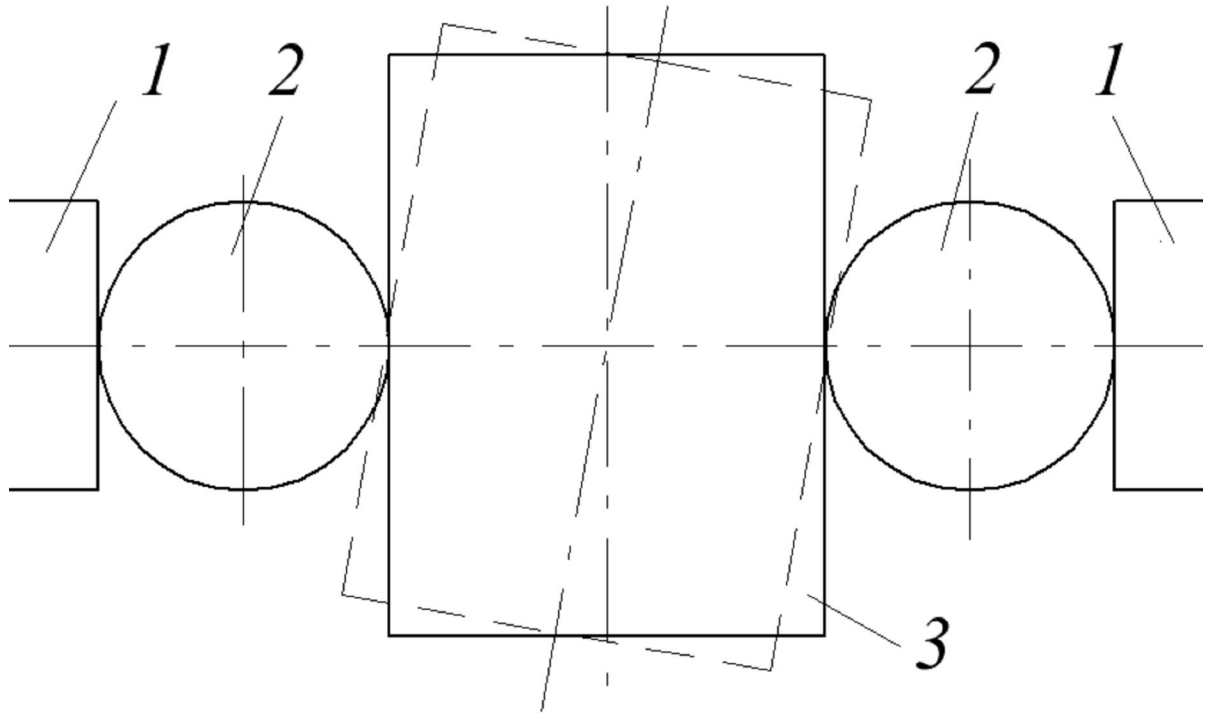


Рисунок 3.10 – Установка горизонтального положения длиномера с использованием уровня электронного из состава государственного рабочего эталона № 3.1.ZZB.0051.2013

При установке калибра относительно измерительной оси значение имеет не только смещение оси калибра по горизонтали, но и ее отклонение от перпендикуляра с осью измерений (рисунок 3.11). Пунктиром на рисунке обозначено положение резьбового калибра при смещении относительно вертикального положения в плоскости, содержащей ось измерений.



Как видно из рисунка, наличие отклонения от перпендикулярности оси калибра приводит к увеличению измеренного расстояния между образующими цилиндрических проволочек. Как и в п. 3.2.2, в такой ситуации измеренная величина не соответствует искомому диаметру калибра.



1 – плоскопараллельные наконечники длиномера, 2 – цилиндрические проволочки, 3 – цилиндрическая образующая калибра-пробки

Рисунок 3.11 – Неперпендикулярность оси калибра и измерительной оси установки

Положение калибра, при котором измерительная ось установки совпадает с геометрическим диаметром калибра, очевидно, соответствует минимальной величине измеренного расстояния  $M$ . Найти такое положение можно по показаниям измерительной системы установки, функция записи минимального значения реализована в основном измерительном ПО. Положение калибра при этом регулируется с помощью специальных винтов в измерительном столе (рисунок 3.12).



1 – предметная плоскость измерительного стола, 2 – винт регулировки наклона предметной плоскости

Рисунок 3.12 – Общий вид измерительного стола установки

Фактически, это один из немногих видов регулировки измерительной системы, который осуществляется только вручную.

В таблице 3.6 даны результаты определения отклонения показаний длиномера в процессе определения минимального значения измеряемой величины.

Таблица 3.6 – Показания длиномера при определении минимального значения измеряемой величины

Номинальный резьбового калибра, мм	средний диаметр	Отклонения показаний длиномера, мкм
1		2
9,206		0,07; 0,05; 0,07; 0,07; 0,04
15,824		0,09; 0,07; 0,08; 0,08; 0,09
18,399		0,10; 0,07; 0,08; 0,07; 0,10
22,330		0,05; 0,06; 0,05; 0,07; 0,07

Продолжение таблицы 3.6

1	2
54,724	0,07; 0,08; 0,07; 0,05; 0,05
54,951	0,08; 0,09; 0,07; 0,07; 0,06
58,148	0,08; 0,08; 0,07; 0,08; 0,09
103,642	0,06; 0,05; 0,07; 0,07; 0,06
128,679	0,09; 0,10; 0,09; 0,08; 0,08
165,275	0,10; 0,10; 0,09; 0,08; 0,09

По результатам исследований границы НСП при определении поправки на установку калибра  $C_v$  составляют 0,1 мкм. В процессе такой регулировки также выявляется и минимизируется возможная неточность установки измерительной проволоочки во впадине резьбы калибра. Применительно к проволоочкам границы НСП при определении данной поправки имеет смысл учитывать для двух противоположных сторон калибра, т.е.

$$\Theta_{C_v} = 0,1 \cdot \sqrt{2} = 0,14 \text{ мкм.}$$

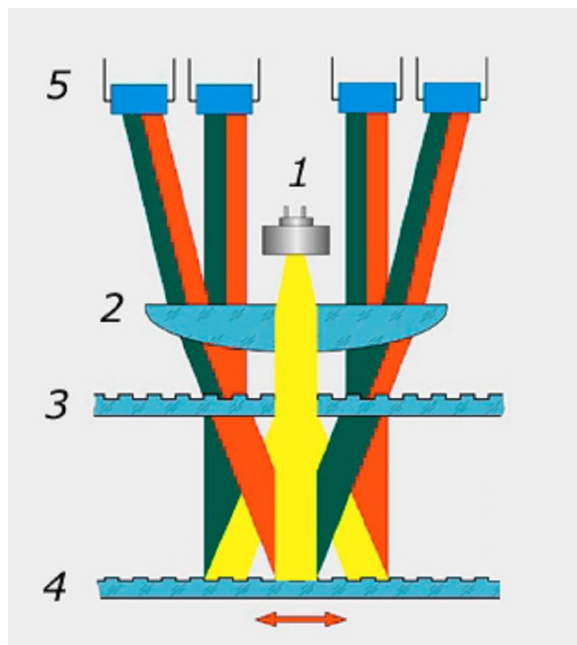
Рассмотренная ошибка имеет более весомое значение именно при измерениях калибров-пробок. При измерении калибров-колец отклонение измерительного стола от горизонтального положения, или же отклонение оси кольца от перпендикуляра, компенсируется на этапе определения константы щупа (рисунок 3.8). Поскольку наконечник представляет собой сферу, то смещение точки контакта сферы с образующей кольца будет симметричным с противоположных концов диаметра, и разным по знаку. Возникающая в данном случае ошибка будет полностью связана с отклонениями диаметров сферических наконечников, что уже было рассмотрено в п. 3.1.3.

### 3.1.6 Погрешность отсчета по измерительной шкале длиномера

В качестве устройства отсчета в длиномере установлена инкрементальная дифракционная шкала фирмы «Heidenhain» («Dr. Johannes Heidenhain GmbH», Германия). Принцип действия подобных устройств схематично изображен на рисунке 3.13.

Пучок излучения от лазерного источника (1) преобразуется в параллельный, проходя через конденсор (2), и попадает на дифракционный шаблон (3). Далее распавшийся пучок взаимодействует с движущейся дифракционной шкалой (4), имеющей такой же период. Отраженные от шаблона и шкалы пучки света интерферируют, образуя сигнал, который регистрируется фотоприемниками (5), и по которому определяются направление и величина перемещения шкалы.

Фактически измеренная с помощью установки длина выражается в количестве штрихов дифракционной шкалы. При этом при каждом наведении (или остановке измерительной каретки) будет возникать ошибка счета штрихов, по величине сопоставимая с шагом шкалы.



1 – источник излучения, 2 – конденсор, 3 – дифракционный шаблон, 4 – подвижная дифракционная шкала, 5 - фотоприемники

Рисунок 3.13 – Принцип работы дифракционной шкалы

Согласно технической спецификации фирмы «Heidenhain» в длиномере используется шкала с разрешением 1 нм. На рисунке 3.14 даны результаты определения погрешности отсчета на разных участках измерительной шкалы установки при автоматическом позиционировании измерительной каретки с шагом 20 мм. Выполнено 5 циклов измерений. Для определения погрешности отсчета была использована система лазерная измерительная XL-80 из состава ГЭТ 2-2010.

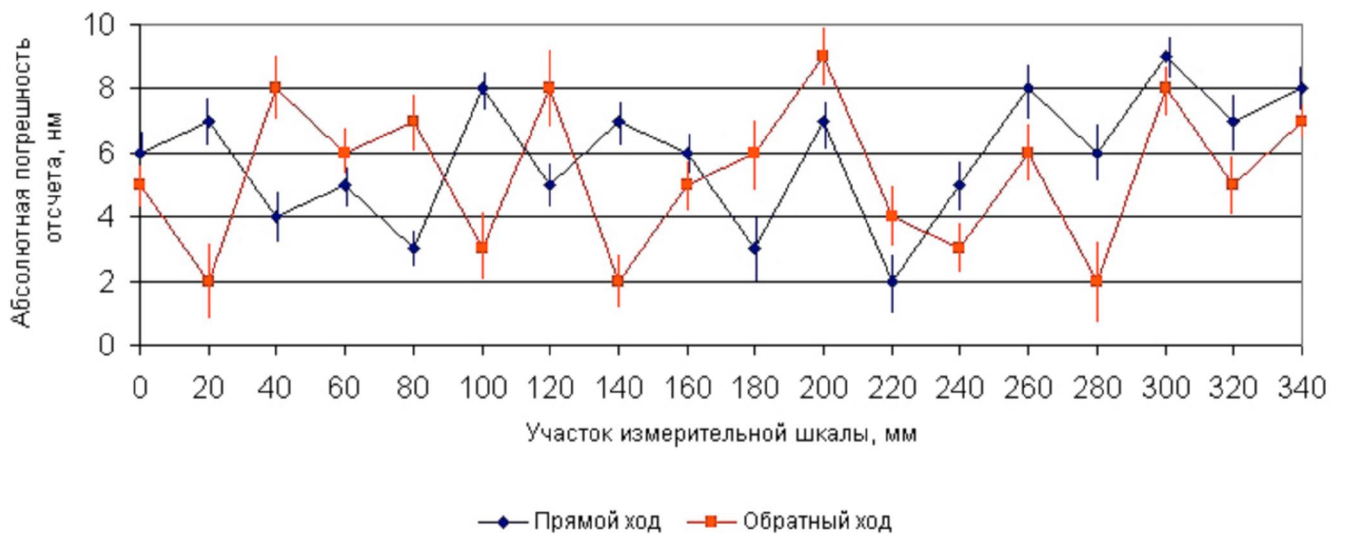


Рисунок 3.14 – Погрешность отсчета по измерительной шкале

По результатам исследований границы НСП при определении погрешности отсчета составляют 0,01 мкм. Поскольку последовательное наведение при измерении среднего диаметра резьбовых калибров происходит не менее трех раз, соответствующую составляющую будем учитывать с коэффициентом  $\sqrt{3}$

$$\Theta_{C_N} = 0,01 \cdot \sqrt{3} = 0,017 \text{ мкм.}$$

### 3.1.7 Погрешность, связанная с дрейфом нуля

Как известно, многие физические характеристики средств измерений могут значительно изменяться с течением времени, что в свою очередь способно повлиять на результат измерений. Особенно сильно это сказывается при

проведении серии измерений одной и той же величины при относительно большом времени, затрачиваемом на осуществление единичного измерения. К таким характеристикам может относиться температурная стабильность, о которой уже было сказано выше, или, что особенно важно в современных средствах измерений, различные электрические флуктуации в цифровых компонентах измерительной системы.

Длиномер из состава установки также обладает инерционными свойствами. По результатам наблюдений установлено, что так называемый дрейф нуля по показаниям установки при разных условиях может достигать нескольких микрометров в сутки. На практике эта величина имеет пренебрежимо малые значения в пределах одного измерительного цикла, если мы говорим, к примеру, о компарировании эталонных концевых плоскопараллельных мер длины. Здесь измерение происходит относительно быстро и инерционные эффекты не успевают оказать ощутимое влияние на результат. При измерении среднего диаметра резьбовых калибров необходимо осуществить более сложную последовательность операций, требующую больших затрат времени.

Использование специализированного ПО TGCS для автоматического расчета результатов измерений среднего диаметра резьбовых калибров позволило сократить время, затрачиваемое на одно измерение. Кроме того, ПО TGCS позволяет в режиме реального времени производить оценку результата измерений и, например, в случае появления статистических выбросов, произвести повторные измерения, не изменяя настроек установки и не проводя повторные настройки. Таким образом, минимизируется влияние динамических характеристик установки на результат измерений.

На рисунке 3.15 приведена экспериментальная зависимость величины дрейфа нуля установки от длительности измерительного цикла  $\tau$  при измерении калибра-пробки M100. Цветом выделены участки, соответствующие длительности измерительного цикла до (красный) и после (зеленый) внедрения ПО TGCS.

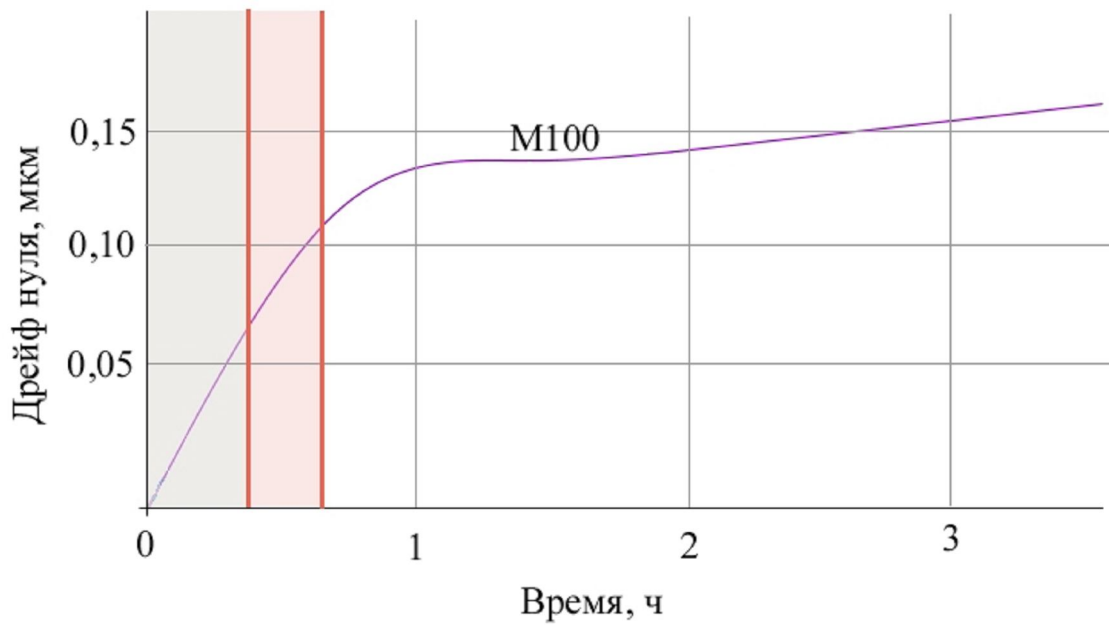


Рисунок 3.15 – Экспериментальное определение дрейфа нуля установки

В таблице 3.7 приведены сравнительные показатели дрейфа нуля в течение измерительного цикла при измерении диаметра с использованием ПО TGCS.

Таблица 3.7 – Дрейф нуля установки

Порядок измеряемого диаметра, мм	Дрейф нуля установки за один измерительный цикл, мкм	
	Без использования TGCS	С использованием TGCS
10	0,04	0,02
30	0,07	0,05
50	0,09	0,05
70	0,09	0,07
100	0,11	0,06
120	0,11	0,07
145	0,13	0,07
175	0,17	0,08
200	0,17	0,08
250	0,19	0,09

По итогам исследований дрейф нуля при использовании ПО TGCS был сокращен вдвое, и составил величину порядка 0,1 мкм.

### 3.1.8 Инструментальная погрешность установки

Под инструментальной погрешностью понимается погрешность, связанная непосредственно с используемым средством измерений, в данном случае – горизонтальный длиномер. Величина такой погрешности включает в себя, в частности, погрешность длины измерительной шкалы, непараллельность установки шкалы относительно направляющих подвижной каретки, несоосность плоскопараллельных щупов длиномера, и др. Иными словами, это погрешность, приписанная средству измерений безотносительно метода измерений.

Результаты исследований установки с использованием эталонных плоскопараллельных концевых мер длины приведены в таблице 3.8. За действительное значение срединной длины меры принималось значение, полученное с использованием ГЭТ 2-2010. За измеренное значение принималось среднее арифметическое пяти измерений.

Таблица 3.8 – Результаты измерений эталонных плоскопараллельных концевых мер длины на установке

Номинальная длина меры, мм	Действительное значение срединной длины меры, мм	Измеренное значение срединной длины меры, мм
1	2	3
100	100,00008	100,00009
150	150,00054	150,00058
200	200,00133	200,00135
250	249,99985	249,99989
300	300,00130	300,00141



Продолжение таблицы 3.8

1	2	3
400	400,00300	400,00303
500	500,00196	500,00189
800	799,99894	799,99897
1000	1000,00078	1000,00085

Данные результаты также были использованы при присвоении установке статуса государственного рабочего эталона единицы длины 1 разряда. Величина погрешности измерений составляет  $\pm(0,05+0,5\times L)$  мкм, где  $L$  – измеряемая длина в метрах.

### **3.2 Неисключенная систематическая погрешность установки при измерении среднего диаметра резьбовых калибров**

На основании приведенного анализа источников возникновения систематической погрешности, можно выделить следующие составляющие НСП установки при измерении резьбовых калибров-пробок и калибров-колец, приведенные в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – 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, $\Theta_{C_N}$	0,017 мкм	0,017 мкм
Погрешность определения поправки на установку калибра на измерительном столе, $\Theta_{C_v}$	0,14 мкм	–
Погрешность определения поправки на ошибку совмещения диаметра калибра с осью измерения, $\Theta_{C_a}$	–	$0,8 \cdot 10^{-7}$ мм
Погрешность определения поправки на измерительное усилие, $\Theta_{C_f}$	0,14 мкм	0,14 мкм
Погрешность определения поправки на дрейф нуля, $\Theta_{C_z}$	0,1 мкм	0,1 мкм
Инструментальная погрешность установки, $\Theta_{C_e}$	$(0,05 + 0,5 \cdot D \cdot 10^{-3})$ мкм	$(0,05 + 0,5 \cdot D \cdot 10^{-3})$ мкм
Погрешность определения диаметра проволочек, $\Theta_{C_w}$	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

$$\Theta_{II}(P) = k \cdot \sqrt{\Theta_{C_N}^2 + \Theta_{C_v}^2 + \Theta_{C_f}^2 + \Theta_{C_z}^2 + \Theta_{C_e}^2 + \Theta_{C_w}^2 + \Theta_{C_{tm}}^2}, \quad (3.11)$$

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

$$\Theta_{II}(0,99) = 1,4 \cdot \sqrt{0,29^2 + (0,55 \cdot D \cdot 10^{-3})^2} \text{ мкм}, \quad (3.12)$$

где  $D$  – измеряемый диаметр в мм.

Из таблицы 3.9 видно, что величина  $\Theta_{Ca}$  является пренебрежимо малой. Следовательно, доверительные границы НСП установки при измерении среднего диаметра калибра-кольца  $\Theta_K(P)$  при доверительной вероятности  $P$  будут равны

$$\Theta_K(P) = k \cdot \sqrt{\Theta_{C_N}^2 + \Theta_{C_f}^2 + \Theta_{C_z}^2 + \Theta_{C_e}^2 + \Theta_{C_w}^2 + \Theta_{C_{im}}^2}, \quad (3.13)$$

При доверительной вероятности  $P=0,99$

$$\Theta_K(0,99) = 1,4 \cdot \sqrt{0,20^2 + (0,55 \cdot D \cdot 10^{-3})^2} \text{ мкм}. \quad (3.14)$$

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

$$S_{\Theta}^{II} = \sqrt{\frac{\Theta_{C_N}^2 + \Theta_{C_v}^2 + \Theta_{C_f}^2 + \Theta_{C_z}^2 + \Theta_{C_e}^2 + \Theta_{C_w}^2 + \Theta_{C_{im}}^2}{3}}. \quad (3.15)$$

Следовательно

$$S_{\Theta}^{II} = \sqrt{\frac{0,29^2 + (0,55 \cdot D \cdot 10^{-3})^2}{3}}. \quad (3.16)$$

Аналогично для калибров-колец:

$$S_{\Theta}^K = \sqrt{\frac{0,20^2 + (0,55 \cdot D \cdot 10^{-3})^2}{3}}. \quad (3.17)$$

### 3.3 Результаты экспериментальных исследований резьбовых калибров

Погрешность передачи единицы характеризуется указанием СКО результата измерений  $S_{\Sigma}$ , обусловленного влиянием случайных погрешностей и НСП метода и средств измерений. Суммарное СКО результата измерений вычисляется по формуле

$$S_{\Sigma} = \sqrt{S_{\Theta}^2 + S^2} . \quad (3.18)$$

Случайную погрешность установки можно оценить на основании экспериментальных данных.

В таблице 3.10 приведен перечень исследуемых резьбовых калибров разного типа и номинального диаметра.

Таблица 3.10 – Перечень исследуемых калибров

Номер калибра	Обозначение калибра	Номер калибра	Обозначение калибра
Калибры-пробки		Калибры-кольца	
1	M10×1,25, 6H, ПР	11	M16×2, 6h, HE
2	M20×2,5, 6H, ПР	12	M22×2,5, 6g, ПР
3	M24×3, 6H, HE	13	M27×3, 6g, HE
4	M56×2, кл.2, ПР	14	M56×1, 6g, HE
5	M56×2, кл.2, HE	15	M64×1,5, 8g, ПР
6	M105×2, 6g, КПР-ПР	16	M75×1,5, 6h, HE
7	M130×2, 6g, КИ	17	M170×1,5, 6h, ПР
8	M170×6, 6e, КПР-ПР	18	G <sup>3/8</sup> ”, В, HE
9	G2”, А, ПР	19	G1 <sup>1/2</sup> ”, В, ПР
10	G <sup>3/8</sup> ”, В, ПР	20	G2 <sup>1/2</sup> ”, В, ПР
-	-	21	Tr 60×3, LH, 7e, HE

В таблице 3.11 приведены результаты исследований резьбовых калибров-пробок и калибров-колец. Для каждого измеряемого диаметра были вычислены СКО результатов измерений  $S$  по формуле

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n \cdot (n - 1)}}, \quad (3.19)$$

где  $x_i$  –  $i$ -й результат наблюдения;

$\bar{x}$  – результат измерения (среднее арифметическое результатов наблюдений);

$n$  – число наблюдений.

После этого для каждого измеряемого диаметра были вычислены доверительные границы случайной погрешности результатов измерений  $\varepsilon(P)$

$$\varepsilon(P) = t \cdot S, \quad (3.20)$$

где  $t=3,25$  – коэффициент Стьюдента, соответствующий доверительной вероятности  $P=0,99$  и числу наблюдений  $n=10$ .

Затем по формуле 3.15 были вычислены суммарное СКО результатов измерений  $S_\Sigma$  и доверительные границы суммарной погрешности  $\Delta_\Sigma(P)$  по формуле

$$\Delta_\Sigma(P) = \pm K_\Sigma \cdot S_\Sigma, \quad (3.21)$$

где  $K_\Sigma$  – коэффициент, определяемый по эмпирической формуле

$$K_\Sigma = \frac{\varepsilon(P) + \Theta(P)}{S + S_\Theta}. \quad (3.22)$$

Таблица 3.11 – Результаты исследований резьбовых калибров-пробок и калибров-колец

№ калибра	Номинальный средний диаметр калибра, мм	Отклонение среднего диаметра от номинального, мкм										СКО результата измерений $S$ , мкм	Доверительные границы случайной погрешности результата измерений $\varepsilon(0,99)$ , мкм
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Калибры-пробки													
1	9,206	-3,5	-3,2	-3,0	-3,1	-3,6	-3,4	-3,1	-3,5	-3,5	-3,1	0,070	0,227
2	18,399	-6,2	-6,6	-6,3	-6,1	-6,4	-6,2	-6,5	-6,3	-6,3	-6,1	0,052	0,168
3	22,330	-0,6	-0,9	-1,1	-1,0	-0,9	-0,8	-0,9	-1,0	-0,6	-0,7	0,054	0,176
4	54,724	-12,5	-12,3	-12,2	-12,5	-12,1	-12,0	-12,1	-12,1	-12,4	-12,2	0,056	0,183
5	54,951	-13,0	-13,0	-13,4	-13,2	-13,3	-13,1	-13,4	-13,2	-13,0	-13,2	0,049	0,159
6	103,642	-4,2	-3,9	-4,0	-4,2	-4,1	-4,3	-4,4	-4,0	-4,2	-3,8	0,059	0,190
7	128,679	-4,0	-4,2	-4,3	-4,2	-4,5	-4,5	-4,2	-4,1	-4,2	-4,3	0,050	0,163
8	165,275	-10,3	-10,0	-10,2	-10,1	-10,0	-10,3	-10,5	-10,2	-10,5	-10,3	0,056	0,183
9	15,824	-13,2	-13,0	-13,1	-13,0	-13,4	-12,9	-13,2	-13,0	-13,2	-13,4	0,054	0,176
10	58,148	+1,8	+2,2	+1,9	+1,7	+1,8	+2,0	+1,9	+2,1	+1,8	+2,0	0,049	0,159

Продолжение таблицы 3.11

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Калибры-кольца													
11	14,523	+4,4	+4,2	+4,0	+4,0	+4,1	+4,2	+4,4	+4,0	+4,0	+4,4	0,056	0,182
12	20,317	-1,6	-1,1	-1,5	-1,2	-1,5	-1,6	-1,2	-1,4	-1,3	-1,2	0,058	0,189
13	24,785	+15,5	+15,6	+15,2	+15,4	+15,5	+15,1	+15,0	+15,2	+15,0	+15,2	0,068	0,222
14	55,166	-4,3	-4,0	-4,2	-4,1	-4,0	-4,3	-4,2	-4,4	-4,1	-4,2	0,042	0,135
15	62,977	-22,4	-22,2	-22,1	-22,0	-22,1	-22,4	-22,1	-22,0	-22,5	-22,2	0,056	0,181
16	73,848	+4,9	+5,0	+4,8	+4,9	+4,9	+4,9	+5,0	+4,7	+5,0	+4,8	0,031	0,102
17	165,280	-9,0	-9,2	-9,4	-9,2	-9,3	-9,5	-9,5	-9,4	-9,5	-9,1	0,057	0,184
18	15,543	-2,7	-2,5	-2,2	-2,4	-2,5	-2,7	-2,4	-2,5	-2,5	-2,3	0,050	0,161
19	46,304	-13,4	-13,2	-13,2	-13,1	-13,3	-13,0	-13,4	-13,2	-13,0	-13,1	0,046	0,149
20	73,685	+3,7	+3,5	+3,7	+3,7	+3,6	+3,5	+3,5	+3,2	+3,2	+3,3	0,062	0,202
21	58,116	-4,6	-4,5	-4,1	-4,3	-4,6	-4,2	-4,5	-4,3	-4,1	-4,2	0,062	0,201

Суммарное СКО результатов измерений  $S_{\Sigma}$  и доверительные границы суммарной погрешности  $\Delta_{\Sigma}(P)$  для каждого измеряемого диаметра при 10 независимых измерениях приведены в таблице 3.12. Как видно из таблицы  $S_{\Sigma}$  не превышает 0,2 мкм, а  $\Delta_{\Sigma}(0,99)$  не превышает  $\pm 0,5$  мкм.

Таблица 3.12 – Результаты исследований резьбовых калибров

Номинальная величина среднего диаметра, мм	Суммарное СКО $S_{\Sigma}$ , мкм	Коэффициент $K_{\Sigma}$	Доверительные границы суммарной погрешности $\Delta_{\Sigma}(0,99)$ , мкм
1	2	3	4
Калибры-пробки			
9,206	0,182	2,666	0,484
18,399	0,175	2,616	0,459
22,330	0,176	2,628	0,463
54,724	0,177	2,635	0,468
54,951	0,175	2,610	0,456
103,642	0,181	2,629	0,475
128,679	0,179	2,613	0,469
165,275	0,184	2,629	0,484
15,824	0,176	2,628	0,463
58,148	0,175	2,610	0,458
Калибры-кольца			
14,523	0,128	2,694	0,346
20,317	0,129	2,703	0,350
24,785	0,134	2,736	0,367
55,166	0,124	2,634	0,327
62,977	0,130	2,686	0,349
73,848	0,122	2,605	0,317



Продолжение таблицы 3.12

1	2	3	4
165,280	0,139	2,674	0,372
15,543	0,126	2,665	0,336
46,304	0,125	2,655	0,332
73,685	0,133	2,712	0,361
58,116	0,132	2,708	0,358

### Выводы к главе 3

Как видно из приведенных выше расчетов, метрологические характеристики установки для измерений среднего диаметра резьбовых калибров выше, чем аналогичные показатели, достигнутые в данной области ведущими национальными метрологическими институтами [22, 32].

В дальнейшем планируется также провести исследование расширенной неопределенности измерений среднего диаметра согласно концепции, предложенной в европейской рекомендации [44]. В частности, так называемая процедура измерений 1а, согласно указанному документу, предполагает учитывать при расчетах неопределенность половины угла профиля резьбы. При измерениях с использованием комплекса ВНИИМ такая составляющая, по предварительным оценкам, даст дополнительный вклад в часть, независимую от измеряемого диаметра, порядка 0,1 мкм.

#### **Глава 4. Перспективы создания поверочных схем в области метрологического обеспечения резьбовых соединений**

Одна из основных проблем законодательного характера в метрологическом обеспечении резьбовых соединений – отсутствие государственных поверочных схем. В связи с этим фактически отсутствует строго регламентированный порядок передачи единицы длины в данной области, неочевидной является прослеживаемость к Государственному первичному эталону единицы длины – метра ГЭТ 2-2010.

Создание во ВНИИМ эталонного комплекса, предназначенного для высокоточных измерений параметров резьб и резьбовых калибров, делает возможным существование поверочных схем с прослеживаемостью единиц к данному комплексу.

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

Во-первых, будет устранено отсутствие строгого формального соподчинения между контрольными и рабочими калибрами резьбы. В частности, речь идет о калибрах метрической резьбы по ГОСТ 18465-73 и ГОСТ 18466-73 [45, 46]. На практике очевидно, что в процессе свинчивания рабочих резьбовых калибров с контрольными происходит передача единиц параметров резьбы от более точных мер менее точным. Но формально данный процесс регламентируется только правилами применения калибров, описанными в соответствующих разделах нормативных документов на сами калибры или рабочие резьбы.

Во-вторых, существование поверочных схем позволит определиться с формальным статусом так называемых установочных калибров. Такие калибры, как правило, входят в комплект поставки трехточечных нутромеров с резьбовыми измерительными головками, предназначенными для измерения среднего диаметра резьбы. Единицу длины такие нутромеры получают от резьбового калибра-кольца с известным значением среднего диаметра. Однако, сами такие калибры не

являются эталонными. Нет даже однозначного взгляда на то, каким образом и в каком объеме следует контролировать параметры таких калибров при поверке нутромеров. В то же время, описанная ситуация полностью аналогична метрологическому обеспечению классических нутромеров, которые поверяются и контролируются по эталонным мерам внутреннего диаметра – измерительным кольцам по государственной поверочной схеме ГОСТ Р 8.763-2011.

В-третьих, существование поверочных схем позволит решить вопросы с внесением в Государственный реестр специализированных средств измерений параметров резьбовых калибров. Пример – 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, данное СИ должно получать от эталонных резьбовых калибров. Однако, поверочной схемы, в рамках которой можно было бы осуществить такую передачу, в настоящее время не существует. Это ведет также к тому, что СИ, позволяющее по своим метрологическим характеристикам осуществлять высокоточные измерения резьбовых калибров, формально не может быть наделено необходимым для этой цели эталонным статусом.

С аналогичной ситуацией уже приходилось сталкиваться на практике при калибровке прибора 481К для ООО «РН-Информ». Но поскольку данное средство измерений предназначено для контроля конических калибров замковой резьбы, прибору был присвоен разряд по поверочной схеме МИ 2712-2002 [47], разработанной ранее отделом геометрических измерений ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева».

Кроме того, следует отметить, что 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». Данный ГОСТ также разработан в рамках данной диссертационной работы. Фактически, новый стандарт разрабатывался взамен МИ 1904-88 [48]. Основной задачей при этом была не только актуализация текста

существующей методики и приведение ее содержания в соответствие с современными техническими реалиями, но и принципиальное утверждение документа именно как методики поверки. Таким образом, мы не только постулируем отнесение резьбовых калибров к средствам измерений, но и даем законодательную основу для утверждения типов резьбовых калибров и их внесения в Государственный реестр средств измерений в ближайшей перспективе.

Стоит также обратить внимание на то, что горизонтальные длиномеры приведены в приложении к ГОСТ Р 8.677-2009 в качестве примеров средств измерений параметров резьбовых калибров. Следовательно, формирование поверочной схемы в данной области с прослеживаемостью к эталонному комплексу с горизонтальным длиномером в составе будет полностью концептуально согласовано с существующей нормативной базой.

Таким образом, актуальность работы по созданию поверочных схем в области метрологического обеспечения резьбовых соединений и наличие теоретических и практических предпосылок к этому очевидны.

#### **4.1 Особенности поверочных схем для средств измерений параметров резьбы**

На данном этапе целесообразной видится реализация данных поверочных схем в виде отдельных документов, распространяющихся, соответственно, на метрическую, трубную цилиндрическую и трапецеидальную резьбы. Это обусловлено наличием специфики нормирования метрологических характеристик для каждого вида резьбы. Кроме того, в нашем распоряжении есть поверочная схема на параметры конической замковой резьбы [47], также выполненная в виде самостоятельного документа, отчасти служащая примером и для вновь разрабатываемых схем. По той же логике было решено не делать поверочные схемы на резьбовые соединения новыми частями уже существующей поверочной схемы для средств измерений длины (ГОСТ Р 8.763-2011).

Рассмотрим особенности формирования упомянутых поверочных схем на примере поверочной схемы для средств измерений параметров метрической

резьбы. Нормативной основой для создания поверочной схемы является документ ГОСТ 8.061-80 [49].

В качестве первичного эталона предлагается использовать высокоточный измерительный комплекс в области метрологического обеспечения резьбовых соединений, разработанный в рамках данной диссертационной работы, состоящий из измерительных установок, описанных в главе 2.

Возвращаясь к иерархии геометрических параметров резьбового калибра, можно обратить внимание, что об относительно второстепенной значимости шага и угла профиля по отношению к среднему диаметру говорит концепция нормирования этих параметров. В частности, по ГОСТ 24997-2004 допуски шага и угла профиля привязаны не столько к классам точности калибров, сколько к длине резьбовой части (в случае шага) и типу профиля резьбы – полный или неполный (для угла профиля) [50]. В то же время для калибров трапецеидальной резьбы к шагу и углу профиля вообще не применяется градация по классам точности [51], равно как и для калибров трубной цилиндрической резьбы, причем в случае последней указано одно значение допуска шага на все типы калибров [52]. Таким образом, в самих поверочных схемах можно допустить отсутствие определенных соотношений по точности шага и угла профиля при переходе от высших разрядов к низшим, что является иллюстрацией описанной выше ситуации.

Действие предлагаемой поверочной схемы распространяется на калибры метрической резьбы в диапазоне от 1 до 200 мм, что соответствует номенклатуре М1 - М200. Данный диапазон выбран, исходя из задачи связать поверочную схему с существующими нормативными документами на исполнительные размеры калибров для метрической резьбы (ГОСТ 18465-73, ГОСТ 18466-73). Технически возможно изготовление резьбовых соединений и, соответственно, калибров к ним и больших номинальных диаметров. В частности, ряд диаметров резьбы по ГОСТ 24705-2004 доходит до 600 мм [53], а ГОСТ 24997-2004 содержит данные, позволяющие определить необходимые исполнительные размеры и допуски соответствующих калибров. С другой стороны, фактический диаметр резьбового

калибра, который может быть измерен с помощью средств измерений, входящих в состав эталонного комплекса, составляет 350 мм – эта величина соответствует диапазону абсолютных измерений установки для измерений среднего диаметра резьбовых калибров из состава эталонного комплекса. Такое ограничение распространяется только на внутренние размеры, т.е. на средний диаметр калибров-колец. Аналогичный размер калибров-пробок можно измерить относительным методом на всем диапазоне измерений установки. На практике же калибры метрической резьбы, поступающие во ВНИИМ, не превышают по номинальному диаметру М175, а наиболее востребованный диапазон составляет М16-М75. Из отдельных измерительных задач есть сведения о зарубежной разработке по индивидуальному заказу измерителя MasterScanner, рассчитанного на калибры М600.

Пределы допускаемых абсолютных погрешностей методов поверки можно определить исходя из обширного опыта передачи единиц при калибровке в данной области, а также на основе аналогичных данных, взятых из существующей поверочной схемы МИ 2712-2002.

В качестве рабочих эталонов 1 разряда предлагается использовать калибры резьбовые для средств измерений параметров резьбовых калибров. Здесь речь идет о калибрах, которые составляют метрологическое обеспечение специализированных средств измерений, одним из примеров которых является уже упоминавшийся измеритель MasterScanner. Использование для поверки таких СИ контрольных калибров по ГОСТ 18465-73 и ГОСТ 18466-73 неприемлемо по показателям точности калибров и измерителей. Погрешность косвенного метода при передаче единиц от эталонного комплекса составит  $\delta'(d_2) = 0,5$  мкм,  $\delta'(P) = 0,5$  мкм,  $\delta'(\alpha/2)=0,02^\circ$  для среднего диаметра, шага и половины угла профиля соответственно.

Указанные выше калибры в предлагаемой поверочной схеме соответствуют уровню рабочих эталонов 2 разряда. При этом предел допускаемых значений доверительных границ погрешности данных СИ соответствует допускам, приведенным в ГОСТ на исполнительные размеры контрольных калибров. К

этому же разряду отнесены калибры резьбовые установочные для средств измерений среднего диаметра резьбы. В данном случае предел допускаемых значений доверительных границ погрешности выбран, исходя из метрологических характеристик типичных рабочих СИ в этой области (резьбовых микрометров и резьбовых нутромеров).

Ко 2 разряду отнесены также средства измерений параметров резьбовых калибров, в частности, измеритель MasterScanner. Показатели точности для данного рода СИ взяты из описания типа измерителя MasterScanner с теми значениями, с которыми данный измеритель зарегистрирован в Федеральном информационном фонде по обеспечению единства измерений. Погрешность косвенного метода при передаче единиц от калибров 1 разряда  $\delta'(d_2) = 0,7$  мкм,  $\delta'(P) = 0,7$  мкм,  $\delta'(\alpha/2) = 0,05^\circ$ . Очевидно, могут существовать и другие СИ, область применения которых распространяется на параметры резьбы, а точность позволяет передавать единицу длины резьбовым калибрам. Специализированные средства измерений в данной области действительно существуют и разрабатываются, но, как уже было указано в обзорной части работы, у сложных измерительных систем функция измерений параметров резьбовых калибров является, как правило, дополнительной опцией. Можно высказать предположение, что одним из факторов, препятствующих появлению СИ, предназначенных исключительно для работы с калибрами, является как раз отсутствие поверочных схем и, собственно, эталонной базы в данной области.

В качестве рабочих средств измерений по предлагаемой поверочной схеме предполагается использование в первую очередь резьбовых нутромеров и резьбовых микрометров (микрометры со вставками). При этом в качестве метода поверки целесообразно указать прямые измерения, что говорит только о том, что средства измерений такого типа сразу выдают в качестве результата величину среднего диаметра резьбы, по аналогии с классическими нутромерами для измерений диаметров отверстий.

Теоретически, в качестве рабочих СИ можно использовать, в частности, проекционные приборы, измеряющие параметры резьбы. Но, как уже было

сказано, большинство таких средств измерений не являются специализированными и успешно прослеживаются к ГЭТ 2-2010 по поверочной схеме ГОСТ Р 8.763-2011.

Проекты государственных поверочных схем для средств измерений параметров трубной цилиндрической резьбы и трапецеидальной однозаходной резьбы можно составить по аналогии с рассмотренной выше поверочной схемой в области метрической резьбы. Схемы будут иметь ту же структуру соподчинения средств измерений по разрядам, а основные отличия будут содержаться в метрологических характеристиках, имеющих свои особенности для каждого из упомянутых типов резьбы. В частности, для трубной цилиндрической резьбы диапазон номинальных шагов составит от 0,907 до 2,309 мм, но при этом фактически ряд шагов такого типа резьбы состоит только из четырех номинальных значений: 0,907; 1,337; 1,814; 2,309 мм. Другая особенность этой поверочной схемы состоит в том, что она полностью охватывает весь диапазон номинальных диаметров резьбы по ГОСТ 6357-81. Этот диапазон от  $G^{1/16}$  до  $G_6$  соответствует величинам среднего диаметра резьбы от 7 до 163 мм, что полностью попадает в диапазон измерений на разработанном эталонном комплексе.

С этой точки зрения сложнее обстоит дело с поверочной схемой для средств измерений параметров трапецеидальной резьбы. На данный момент мы вынуждены ограничить применение данной схемы диапазоном Tr8-Tr170, что соответствует среднему диаметру от 7 до 167 мм. Данное ограничение связано с техническими характеристиками аксессуаров для измерений среднего диаметра из состава установки, входящей в состав эталонного комплекса, к которому осуществляется прослеживание единиц. Ограничение распространяется не столько на номинальный диаметр, сколько на номинальный шаг резьбы. Диаметры гладких цилиндрических проволок и сферических наконечников T-образных вставок предназначены для шага не более 6 мм. Таким образом, даже для номинальных диаметров ниже Tr170 разрабатываемая поверочная схема



распространяется не полностью, т.к. в данном диапазоне присутствуют резьбы с шагом, превышающим 6 мм.

## 4.2 Применение поверочных схем для средств измерений параметров резьбы во ВНИИМ

Фактически об успешном применении описанных выше 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 единиц геометрических параметров резьбового калибра к созданному в рамках данной работы эталонному комплексу с заявленными в главе 3 пределами допускаемых значений доверительных границ погрешности.

Кроме того, с учетом появления новой эталонной базы, в 2014 году был пересмотрен внутренний документ СК 03-251-09/14-Т «Калибры резьбовые. Методика калибровки», при работе по которому фактически осуществляется передача единиц в области измерений параметров резьбы от эталонных СИ резьбовым калибрам в отсутствие утвержденных государственных поверочных схем. При подготовке данной методики был также осуществлен расчет неопределенности измерений среднего диаметра с использованием исследованной установки. В терминах расширенной неопределенности измерений [54, 55] при коэффициенте охвата  $k_{0,95}=2$  были получены следующие результаты для калибра-пробки

$$U_c = \sqrt{0,49^2 + (1,10 \cdot 10^{-3})^2 \cdot D^2} \text{ мкм,} \quad (4.1)$$

для калибра-кольца

$$U_c = \sqrt{0,41^2 + (1,10 \cdot 10^{-3})^2 \cdot D^2} \text{ мкм.} \quad (4.2)$$

По данному документу к настоящему времени успешно выполнена калибровка около четырехсот резьбовых калибров разного типа, и, как видно из статистической диаграммы на рисунке 1.28, существует очевидная тенденция к увеличению количества резьбовых калибров, подлежащих измерениям. При этом, несмотря на описанные выше ограничения по применимости поверочных схем, еще не было ни одного случая, когда бы новый эталонный комплекс не удовлетворял требованиям по калибровке резьбовых калибров. Это еще раз показывает, что и комплекс, и предлагаемые поверочные схемы полностью работоспособны. Область применения схем распространяется на те диапазоны номинальных параметров резьбы, которые являются наиболее востребованными в рамках существующих технических реалий. Это относится даже к трапецеидальной резьбе, которая на практике встречается гораздо реже, чем резьба других типов. Такая ситуация обусловлена тем, что трапецеидальная резьба наиболее часто используется в так называемых ходовых винтах, которых, очевидно, гораздо меньше, чем винтов крепежных с метрической резьбой.

#### **Выводы к главе 4**

Предложенные государственные поверочные схемы для средств измерений параметров резьбы являются одним из шагов к решению проблем, связанных с метрологическим обеспечением в данной области, и успешно выполняют сформулированные в начале главы задачи. Среди таких задач, во-первых, осуществление строгого соподчинения контрольных и рабочих резьбовых калибров по ГОСТ 18465-73 и ГОСТ 18466-73. Во-вторых, решение вопроса о формальном статусе установочных резьбовых калибров для средств измерений среднего диаметра резьбы. В-третьих, введение в систему передачи единиц параметров резьбы специализированных СИ, таких как измеритель MasterScanner.

Среди основных направлений по совершенствованию представленных проектов можно определить следующие.

Во-первых, возвращаясь к специализированным СИ параметров резьбовых калибров, следует рассмотреть вопрос о введении в поверочную схему дополнительного уровня для таких СИ. Технически, при определенных соотношениях пределов допускаемых значений доверительных границ погрешности можно было бы передавать единицы параметров калибра от СИ параметров резьбовых калибров калибрам резьбовым контрольным.

Во-вторых, не стоит забывать, что помимо прибора двухкоординатного измерительного ДИП-1 и длиномера горизонтального из состава эталонного комплекса, являющегося первичным эталоном в разработанных поверочных схемах, существуют аналогичные СИ с более высокой погрешностью, порядок которой, однако, позволяет осуществлять передачу единиц калибрам рабочим и в некоторых случаях – контрольным. Следует рассмотреть возможность заимствования таких СИ из ГОСТ Р 8.763-2011 с их введением в разработанные поверочные схемы на уровне рабочих эталонов 1 разряда.

В-третьих, перспективным видится расширение области применения эталонного комплекса (и, соответственно, поверочных схем) в части трапецеидальной резьбы путем разработки аксессуаров для длиномера горизонтального из состава эталона, позволяющих выполнять измерения среднего диаметра калибров трапецеидальной резьбы с большими номинальными значениями шага. По аналогии с внутренними измерениями можно расширить и область измерений резьбовых калибров-пробок. Для этого предполагается разработка плоскопараллельных наконечников с увеличенной площадью контактной поверхности, которая позволила бы осуществлять измерения калибров также с номинальным шагом свыше 6 мм с использованием проволочек и роликов по ГОСТ 2475-88.

Кроме того, можно предложить ряд мероприятий по дальнейшему совершенствованию системы метрологического обеспечения резьбовых соединений.

1. Пересмотр и актуализация существующих стандартов в области резьбовых соединений.

2. Внедрение поверочных схем в области измерений геометрических параметров резьбовых соединений и резьбовых калибров на производственных предприятиях.

3. Внесение резьбовых калибров в Государственный реестр средств измерений РФ.

4. Совершенствование эталонных баз метрологических центров и институтов в области измерений резьбовых калибров.

5. Расширение международного сотрудничества в области метрологического обеспечения резьбовых соединений, организация сличений резьбовых калибров. В частности, уже достигнута договоренность о проведении международных сличений резьбовых калибров в рамках КОOMET.

## 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 ВРМ 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 использованных источников**

1. Зворыкин А.А., Осьмова Н.И., Чернышев В.И., Шухардин С.В. История техники. М.: Соцэкгиз. – 1962. – 772 с.
2. Van der Kamp T., Vagovic P., Baumbach T., Riedel A. A Biological Screw in a Beetle's Leg // Science. – 2011. – № 333 (6038). – P. 52.
3. Прокофьев А.Н. Надежность резьбовых соединений // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2006. – № 2 (10). – С. 48-51.
4. Москалев А.А. Особенности поверки калибров замковой резьбы // III международный конкурс Лучший молодой метролог КООМЕТ-2009. Тезисы докладов. БелГИМ. – 2009. – С. 123-128.
5. Курганова Ю.А. ОМД: краткий исторический курс, основы и тенденции развития. УлГУ. – 2005. – 43 с.
6. Atkinson N. Sir Joseph Witworth: The World's Best Mechanician. Sutton. – 1996. – 352 p.
7. Тюрин Н.И. Введение в метрологию. М.: Издательство стандартов. – 1973. – 280 с.
8. Патент № 57739 от 31.08.1940 «Способ измерения среднего диаметра внутренней резьбы». Автор: М.Л. Бржезинский.
9. МИ 1812-87. Калибры резьбовые конические. Методика контроля. Введ. 01.07.1988. М.: Издательство стандартов. – 1988. – 48 с.
10. Аванесов В.С., Балацкий Е.В., Гинзбург Э.С., Кершенбаум В.Я., и др. Семь раз отмерь. Круглый стол по метрологическим проблемам нефтегазового комплекса // Мир измерений. – 2010. – № 2. – С. 7-15.
11. Пospelов Р.В., Позднышев В.Н., и др. Метрологическое обеспечение параметров замковых резьб и резьбовых соединений труб нефтяного сортамента // Надежность и сертификация оборудования для нефти и газа. – 2002. – № 1. – С. 8-10.
12. ГОСТ 11708-82. Резьба. Термины и определения. Введ. 01.01.1984. М.: Издательство стандартов. – 1983.

13. Бурдун Г.Д., Бирюков Г.С., Богуславский М.Г., и др. Линейные и угловые измерения. Москва. Издательство стандартов. – 1977. – 512 с.
14. DIN-Taschenbuch 45. Gewinde: Normen. Beuth Verlag GmbH. – 1993. – 412 p.
15. Апарин Г.А., Городецкий И.Е. Допуски и технические измерения. М.: МАШГИЗ. – 1953. – 640 с.
16. Захаренко Ю.Г., Кононова Н.А., Москалев А.А., Фомкина З.В. Возможности «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» в области высокоточных измерений резьбовых соединений // Пятая всероссийская научно-техническая конференция Измерения и испытания в судостроении и смежных отраслях Судометрика-2014. Тезисы докладов. Метрологическая ассоциация промышленников и предпринимателей. – 2014. – С. 148-152.
17. Меркас Т.Р., Аско В. Thread Gauge Calibration for Industrial Applications // Journal of Mechanical Engineering. – 2010. – № 56. – P. 637-643.
18. Димов Ю.В. Метрология, стандартизация и сертификация. СПб.: Питер. – 2013. – 496 с.
19. Berndt G. Die Anlagekorrekturen bei der Bestimmung des Flankendurchmessers von symmetrischen und unsymmetrischen Aussen- und Innengewinden nach der Dreidrahtmethode oder mittels zweier Kugeln. Zeitschrift für Instrumentenkunde, 60. – 1940.
20. Mosckalev A. High-accurate measurements of thread gages using the Labconcept NANO horizontal instrument // 24<sup>th</sup> National scientific symposium with international participation Metrology and metrology assurance 2014. Proceedings. Sozopol, Bulgaria. – 2014. – P. 480-485.
21. The BIPM key comparison database. Calibration and Measurement Capabilities. Length [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://kcdb.bipm.org/appendixC/>, свободный. Яз. англ. (дата обращения 30.09.2016).
22. Mudronja V., Simunovic V., and others. Final report on EURAMET.L-S21: ‘Supplementary comparison of parallel thread gauges’ // Metrologia. – 2015. – V. 52.



23. Thalmann R. Weshalb Schweizer Wellen so gut in deutsche Bohrungen passen // METinfo. – 2010. – V.17. – № 1. – P. 4-11.
24. Galestien Ir.R. Advanced 2d Scanning: the solution for the calibration of thread ring and thread plug gauges // Proc. of The 13th International Metrology Congress «Transverse Disciplines in Metrology». Lille, France. – 2007. – P. 363-372.
25. Christoph R., Neumann H.J. X-ray Tomography in Industrial Metrology. Verlag Moderne Industrie. – 2011. – 95 p.
26. Косаревский С.В., Латыпов В.Н. Математическое моделирование комплексного контроля резьбы на основе данных, полученных с устройств компьютерной томографии. М.: ФГУП «Академиздатцентр «Наука». – 2011. – Т.23. – № 6. – С. 68-80.
27. Sheng C., Dongbiao Z., Yonghua L. A New Compensation Method for Measurement of Thread Pitch Diameter by Profile Scanning // Measurement Science Review. – 2014. – V. 14. – № 6. – P. 323-330.
28. Tong Q., Jiao C., Huang H., Li G., Ding Z.L., Yuan F. An automatic measuring method and system using laser triangulation scanning for the parameters of a screw thread // Measurement Science and Technology. – 2014. – № 25 (3).
29. Tong Q., Ding Z.L., Chen J.C., Ai L.L., Yuan F. The research of screw thread parameter measurement based on position sensitive detector and laser // Journal of Physics. – 2006. – № 48. – P. 561-565.
30. NPL Notes on Screw Gauges. NPL. – 2010. – 114 p.
31. Измерительный инструмент и приборы. М.: НИИМАШ. – 1976. – 560 с.
32. Захаренко Ю.Г., Кононова Н.А., Москалев А.А. Измерения геометрических параметров резьбовых калибров. // Измерительная техника. – № 2. – 2016. – С. 24-27.
33. ГОСТ 2475-88. Проволочки и ролики. Технические условия. Введ. 01.01.1990. М.: Издательство стандартов. – 1990. – 10 с.
34. ГОСТ Р 8.677-2009. ГСИ. Калибры резьбовые цилиндрические. Методика поверки. Введ. 01.12.2010. М.: Стандартиформ. 2010. – 32 с.

35. Аскарова 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.
36. Аскарова Э.Ф., Москалев А.А., Михеев Е.А. Разработка программного обеспечения для оптимизации измерений резьбовых калибров // Тезисы докладов 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](http://kmu.ifmo.ru/collections_article/3456/razrabotka_programmnogo_obespecheniya_dlya_optimizacii_izmereniy_rezbovyh_kalibrov.htm), свободный (дата обращения 15.04.2016).
37. Тарбеев Ю. В., Слаев В. А., Чуновкина А. Г. Проблемы применения в России международного Руководства по выражению неопределённости измерения // Измерительная техника, № 1. – 1997. – С. 69-72.
38. ГОСТ 8.050-73. ГСИ. Нормальные условия выполнения линейных и угловых измерений. Введ. 01.01.1975. М. Издательство стандартов. – 1975. – 16 с.
39. P. Koschke, C. Rinn, W. Hüttl. Almemo Manual. Holzkirchen. 2011. – 216 p.
40. Новикова С.И. Тепловое расширение твердых тел. М.: Наука, 1974. – 294 с.
41. МИ 2078-90. ГСИ. Проволочки и ролики. Методика поверки. Введ. 01.07.1991. М.: Издательство стандартов. 1991. – 21 с.
42. 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.
43. 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.

44. Determination of Pitch Diameter of Parallel Thread Gauges by Mechanical Probing. Calibration Guide. EURAMET/cg-10/v.01. – 2007. – 20 p.
45. ГОСТ 18465-73. Калибры для метрической резьбы от 1 до 68 мм. Исполнительные размеры. Введ. 01.07.1973. М.: Издательство стандартов. – 1973. – 443 с.
46. ГОСТ 18466-73. Калибры для метрической резьбы свыше 68 до 200 мм. Исполнительные размеры. Введ. 01.07.1973. М.: Издательство стандартов. – 1973. – 335 с.
47. МИ 2712-2002. ГСИ. Поверочная схема для средств измерений параметров замковой резьбы. Введ. 18.01.2002. СПб.: ГНМЦ ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева». – 2001. – 7 с.
48. МИ 1904-88. Калибры резьбовые цилиндрические. Методика контроля. Введ. 01.05.1989. М.: Издательство стандартов. – 1989. – 59 с.
49. ГОСТ 8.061-80. ГСИ. Поверочные схемы. Содержание и построение. Введ. 01.01.1981. М.: Издательство стандартов. – 1980. – 11 с.
50. ГОСТ 24997-2004. Калибры для метрической резьбы. Допуски. Введ. 01.07.2005. М.: Стандартиформ. – 2005. – 27 с.
51. ГОСТ 10071-89. Калибры для однозаходной трапецеидальной резьбы. Допуски. Введ. 01.07.1990. М.: Издательство стандартов. – 1990. – 17 с.
52. ГОСТ 2533-88. Калибры для трубной цилиндрической резьбы. Допуски. Введ. 01.01.1989. М.: Издательство стандартов. – 1988. – 22 с.
53. ГОСТ 24705-2004. Основные нормы взаимозаменяемости. Резьба метрическая. Основные размеры. Введ. 01.07.2005. М.: Издательство стандартов. – 2005. – 19 с.
54. ГОСТ Р 54500.3-2011. Неопределенность измерения. Руководство по выражению неопределенности измерения. Введ. 16.11.2011. М.: Стандартиформ. – 2012. – 107 с.
55. Фридман А.Э. Основы метрологии. Современный курс. – С.-Пб.: НПО «Профессионал». – 2008. – 284 с.

## Приложение А

### Акты о внедрении

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО  
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ  
РОССТАНДАРТ



Федеральное государственное  
унитарное предприятие «Всероссийский  
научно-исследовательский институт метрологии им. Д.И. Менделеева»  
ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»

190005, Санкт-Петербург, Московский пр., 19 Тел. (812) 251-76-01, факс (812) 713-01-14  
e-mail: [info@vniim.ru](mailto:info@vniim.ru), <http://www.vniim.ru> ОКПО 02566450, ОГРН 1027810219007 ИНН/КПП 7809022120/783901001  
регистрационный номер аттестата аккредитации RA.RU.311541

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора по научной работе  
ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»

К.В. Чекирда

26 2017 г.



АКТ

о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы  
инженера 2 категории ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева»  
Москалева Андрея Андреевича

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы Москалева А.А., представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в отделе геометрических измерений ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева».

По результатам исследований представленная в диссертации высокоточная измерительная установка утверждена в качестве Государственного рабочего эталона 1 разряда единицы длины (регистрационный номер 3.1.ZZB.0019.2014, приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии № 1368 от 22 сентября 2014 г.).

**Продолжение приложения А**

Разработанный и внедренный измерительный комплекс используется:

1. При выполнении работ в рамках международных сличений мер внутреннего и наружного диаметров по темам 690/RU/16 (пилот-лаборатория – ВНИИМ) и CCL-K4.2015 (пилот-лаборатория – NIST, США);
2. При выполнении проверок и калибровок эталонных плоскопараллельных концевых мер длины и эталонных измерительных колец;
3. При выполнении работ по измерениям геометрических параметров резьбовых соединений, а также калибровке резьбовых калибров-пробок и калибров-колец метрической, трубной цилиндрической и трапецеидальной резьбы.

И.о. руководителя отдела  
геометрических измерений



Н.А. Кононова

## Продолжение приложения А

**Prizma** 

192148, Россия  
Санкт-Петербург  
ул. Седова, д. 13, оф. 211

+7 (812) 309-48-81  
info@proprizma.ru  
proprizma.ru | пропризма.рф

## АКТ

о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы  
Москалева Андрея Андреевича

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы «Разработка и исследование высокоточного измерительного комплекса для метрологического обеспечения резьбовых соединений», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, используются в ООО «Призма».

Полученные в рамках данной работы результаты исследований показателей точности длиномеров горизонтальных в области измерений среднего диаметра резьбовых калибров позволили актуализировать метрологические и технические характеристики длиномеров, вводимых в эксплуатацию ООО «Призма».

Разработанное программное обеспечение «Thread Gages Calculation Software» позволило существенно оптимизировать процесс измерений среднего диаметра резьбовых калибров на поставляемых ООО «Призма» длиномерах.

Внедрение результатов данной диссертационной работы также рекомендовано на следующих предприятиях, эксплуатирующих горизонтальные длиномеры, поставленные и обслуживаемые ООО «Призма»:

- Филиал ОАО «Концерн Росэнергоатом» «Смоленская атомная станция»;
- ПАО «Корпорация ВСМПО-АВИСМА»;
- Филиал ОАО «РЖД» структурное подразделение Октябрьской железной дороги Октябрьский центр метрологии.

Технический директор  
ООО «Призма»



Конкин Д.Б.

## Продолжение приложения А



**TRIMOS**

TRIMOS SA  
Av.de Longemalle 5  
CH-1020 Renens  
T. +41 21 633 01 01  
F. +41 21 633 01 02

Renens, 8 June 2017

### TO WHOM IT MAY CONCERN

#### Statement of implementation of the results of the dissertation by Moskalyov Andrey Andreevich

This is to confirm that the results of the dissertation work «Development and a research of the high-precision measuring complex for metrological insurance of thread joints» presented for a degree of Ph.D. in Technical Sciences are used in the «Trimos S.A.».

The research results of the uncertainty components of horizontal instruments in the field of measuring the pitch diameter of thread gages attained in the work, and the decisions for their minimization, allowed to update metrological and technical specifications of horizontal instruments produced by «Trimos S.A.».

#### Акт о внедрении результатов кандидатской диссертационной работы Москалева Андрея Андреевича

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы «Разработка и исследование высокоточного измерительного комплекса для метрологического обеспечения резьбовых соединений», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук, использованы в фирме «Trimos S.A.».

Полученные в рамках работы результаты исследований составляющих погрешности длиномеров горизонтальных в области измерений среднего диаметра резьбовых калибров, а также предложенные пути их минимизации, позволили актуализировать метрологические и технические характеристики выпускаемых фирмой «Trimos S.A.» длиномеров.

  
TRIMOS S.A.  
5, av. Longemalle  
CH-1020 RENENS

## Приложение Б

### Фрагмент исходного кода программного обеспечения TGCS

```

{
    object[] TrapezoidalP = { 1.5, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0, 6.0 };
    object[] TrapezoidalDW = { 0.725, 1.100, 1.650, 2.050, 2.550, 3.200 };
    object[] MetricP = { 0.20, 0.25, 0.30, 0.35, 0.40, 0.45, 0.50, 0.60, 0.70, 0.75, 0.80, 1.00, 1.25, 1.50,
1.75, 2.00, 2.50, 3.00, 3.50, 4.00, 4.50, 5.00, 5.50, 6.00 };
    object[] MetricDW = { 0.170, 0.195, 0.220, 0.250, 0.290, 0.335, 0.390, 0.455, 0.620, 0.725, 0.895,
1.100, 1.350, 1.650, 2.050, 2.550, 3.200, 4.000 };
    object[] StraightPipeP = { 0.907, 1.337, 1.814, 2.309 };
    object[] StraightPipeDW = { 0.530, 0.725, 1.100, 1.350 };
    int ComboBox1ListNow = 0;
    int ComboBox2ListNow = 0;
    double D2;
    public Form1()
    {
        InitializeComponent();
    }
    private double rezult()
    {
        double M, p, dw;
        double.TryParse(textBox1.Text, out M);
        double.TryParse(comboBox1.Text.Replace(".", System.Globalization.CultureInfo.
CurrentCulture.NumberFormat.NumberDecimalSeparator), out p);
        double.TryParse(comboBox1.Text.Replace(",", System.Globalization.CultureInfo.
CurrentCulture.NumberFormat.NumberDecimalSeparator), out p);
        double.TryParse(comboBox2.Text.Replace(".", System.Globalization.CultureInfo.
CurrentCulture.NumberFormat.NumberDecimalSeparator), out dw);
        double.TryParse(comboBox2.Text.Replace(",", System.Globalization.CultureInfo.
CurrentCulture.NumberFormat.NumberDecimalSeparator), out dw);
        if (radioButton4.Checked == true)
        {

```



**Продолжение приложения Б**

```
if (radioButton3.Checked == true)
{
    D2 = M + 1.865 * p - 4.861 * dw;
}
else if (radioButton2.Checked == true)
{
    D2 = M + 0.960 * p - 3.165 * dw;
}
else if (radioButton1.Checked == true)
{
    D2 = M + 0.866 * p - 3 * dw;
}
}
else if (radioButton5.Checked == true)
{
    if (radioButton3.Checked == true)
    {
        D2 = M - 1.865 * p + 2.861 * dw;
    }
    else if (radioButton2.Checked == true)
    {
        D2 = M - 0.960 * p + 1.165 * dw;
    }
    else if (radioButton1.Checked == true)
    {
        D2 = M - 0.866 * p + dw;
    }
}
return D2;
}
private void button3_Click(object sender, EventArgs e)
{
    panel2.Visible = false;
    panel3.Visible = true;
}
```

**Продолжение приложения Б**

```
if (!radioButton4.Checked && !radioButton5.Checked)
{
    radioButton4.Select();
}
}
private void timer1_Tick(object sender, EventArgs e)
{
    timer1.Stop();
    radioButton1.Select();
    panel1.Visible = false;
    panel2.Visible = true;
}
private void button6_Click(object sender, EventArgs e)
{
    panel3.Visible = false;
    panel2.Visible = true;
}
private void button7_Click(object sender, EventArgs e)
{
    comboBox1.Items.Clear();
    comboBox2.Items.Clear();
    if (radioButton3.Checked == true)
    {
        comboBox1.Items.AddRange(TrapezoidalP);
        comboBox2.Items.AddRange(TrapezoidalDW);
    }
    if (radioButton2.Checked == true)
    {
        comboBox1.Items.AddRange(StraightPipeP);
        comboBox2.Items.AddRange(StraightPipeDW);
    }
    if (radioButton1.Checked == true)
    {
        comboBox1.Items.AddRange(MetricP);
```

**Продолжение приложения Б**

```
        comboBox2.Items.AddRange(MetricDW);
    }
    comboBox1.SelectedIndex = ComboBox1ListNow;
    comboBox2.SelectedIndex = ComboBox2ListNow;
    if (radioButton4.Checked==true)
    {
        panel3.Visible = false;
        label6.Text = "Diameter of wire (d";
        panel4.Visible = true;
    }
    else if (radioButton5.Checked == true)
    {
        panel3.Visible = false;
        label6.Text = "Diameter of sphere (d";
        panel4.Visible = true;
    }
}
private void button8_Click(object sender, EventArgs e)
{
    panel7.BringToFront();
    panel7.Visible = true;
}
private void button10_Click(object sender, EventArgs e)
{
    panel4.Visible = false;
    label16.Text = comboBox1.SelectedItem.ToString();
    label21.Text = comboBox2.SelectedItem.ToString();
    panel5.Visible = true;
    textBox1.Focus();
}
private void button11_Click(object sender, EventArgs e)
{
    panel4.Visible = false;
    panel3.Visible = true;
```

**Продолжение приложения Б**

```
}  
private void comboBox1_SelectedIndexChanged(object sender, EventArgs e)  
{  
    ComboBox1ListNow=comboBox1.SelectedIndex;  
}  
private void radioButton1_CheckedChanged(object sender, EventArgs e)  
{  
    ComboBox1ListNow = 0;  
    ComboBox2ListNow = 0;  
}  
private void radioButton2_CheckedChanged(object sender, EventArgs e)  
{  
    ComboBox1ListNow = 0;  
    ComboBox2ListNow = 0;  
}  
private void radioButton3_CheckedChanged(object sender, EventArgs e)  
{  
    ComboBox1ListNow = 0;  
    ComboBox2ListNow = 0;  
}  
private void comboBox2_SelectedIndexChanged(object sender, EventArgs e)  
{  
    ComboBox2ListNow = comboBox2.SelectedIndex;  
}  
private void button15_Click(object sender, EventArgs e)  
{  
    panel5.Visible = false;  
    panel4.Visible = true;  
}  
private void textBox1_KeyPress(object sender, KeyPressEventArgs e)  
{  
    if (!char.IsControl(e.KeyChar) && !char.IsDigit(e.KeyChar) && (e.KeyChar != '!') &&  
(e.KeyChar != ','))
```

**Продолжение приложения Б**

```

    {
        e.Handled = true;
    }
if (((e.KeyChar == '.') || (e.KeyChar == ',')) && ((sender as TextBox).Text.IndexOf('.') > -1))
    {
        e.Handled = true;
    }
if (((e.KeyChar == '.') || (e.KeyChar == ',')) && ((sender as TextBox).Text.IndexOf(',') > -1))
    {
        e.Handled = true;
    }
}
private void button14_Click(object sender, EventArgs e)
{
    if (textBox1.Text != "")
    {
        if ((textBox1.Text[textBox1.Text.Length - 1] == ',') || (textBox1.Text[textBox1.Text.Length -
1] == '.'))
        {
            textBox1.Text = textBox1.Text.Substring(0, textBox1.Text.Length - 1);
        }
        textBox1.Text = textBox1.Text.Replace(".", System.Globalization.CultureInfo.
CurrentCulture.NumberFormat.NumberDecimalSeparator);
        textBox1.Text = textBox1.Text.Replace(",", System.Globalization.CultureInfo.
CurrentCulture.NumberFormat.NumberDecimalSeparator);
        panel5.Visible = false;
        label9.Text = (Math.Round(rezult(), 4)).ToString();
        panel6.Visible = true;
    }
    else
    {
        MessageBox.Show("Enter the M value to do the next step!");
    }
}
}

```

**Продолжение приложения Б**

```
private void button19_Click(object sender, EventArgs e)
{
    panel6.Visible = false;
    panel5.Visible = true;
    textBox1.Focus();
}
private void button20_Click(object sender, EventArgs e)
{
    panel6.Visible = false;
    panel2.Visible = true;
}
private void button18_Click(object sender, EventArgs e)
{
    Application.Exit();
}
private void panel1_Click(object sender, EventArgs e)
{
    timer1.Stop();
    radioButton1.Select();
    panel1.Visible = false;
    panel2.Visible = true;
}
private void panel1_DoubleClick(object sender, EventArgs e)
{
    timer1.Stop();
    radioButton1.Select();
    panel1.Visible = false;
    panel2.Visible = true;
}
private void button21_Click(object sender, EventArgs e)
{
    panel7.Visible = false;
```

**Продолжение приложения Б**

```
}  
private void button1_Click(object sender, EventArgs e)  
{  
    panel7.BringToFront();  
    panel7.Visible = true;  
}  
private void button4_Click(object sender, EventArgs e)  
{  
    panel7.BringToFront();  
    panel7.Visible = true;  
}  
private void button12_Click(object sender, EventArgs e)  
{  
    panel7.BringToFront();  
    panel7.Visible = true;  
}  
private void button16_Click(object sender, EventArgs e)  
{  
    panel7.BringToFront();  
    panel7.Visible = true;  
}  
private void button17_Click(object sender, EventArgs e)  
{  
    panel8.BringToFront();  
    panel8.Visible = true;  
}  
private void button13_Click(object sender, EventArgs e)  
{  
    panel8.BringToFront();  
    panel8.Visible = true;  
}  
private void button9_Click(object sender, EventArgs e)  
{  
    panel8.BringToFront();
```

**Продолжение приложения Б**

```

    panel8.Visible = true;
}
private void button5_Click(object sender, EventArgs e)
{
    panel8.BringToFront();
    panel8.Visible = true;
}
private void button2_Click(object sender, EventArgs e)
{
    panel8.BringToFront();
    panel8.Visible = true;
}
private void button22_Click(object sender, EventArgs e)
{
    panel8.Visible = false;
}
private void textBox1_TextChanged(object sender, EventArgs e)
{
    //Разделение целой и дробной части
    string[] TextSplit = (sender as TextBox).Text.Split(new char[] { '.', ',' });
    //Проверка длины дробной части: есть дробная часть, разрядов более 5
    if ((TextSplit.Length > 1) && (TextSplit[1].Length == 5))
    {
        int PositionCusor = (sender as TextBox).SelectionStart;
        (sender as TextBox).Text = (sender as TextBox).Text.Remove((PositionCusor - 1), 1);
        (sender as TextBox).SelectionStart= PositionCusor-1;
    }
}
private void textBox1_KeyDown(object sender, KeyEventArgs e)
{
    // Нажатие Enter
    if (e.KeyCode == Keys.Enter)
    {
        if (textBox1.Text != "")

```



**Продолжение приложения Б**

```
{
    if ((textBox1.Text[textBox1.Text.Length - 1] == ',') || (textBox1.Text[textBox1.Text.Length
- 1] == '.'))
    {
        textBox1.Text = textBox1.Text.Substring(0, textBox1.Text.Length - 1);
    }
    textBox1.Text = textBox1.Text.Replace(".", System.Globalization.CultureInfo.
CurrentCulture.NumberFormat.NumberDecimalSeparator);
    textBox1.Text = textBox1.Text.Replace(",", System.Globalization.CultureInfo.
CurrentCulture.NumberFormat.NumberDecimalSeparator);
    panel5.Visible = false;
    label9.Text = (Math.Round(rezult(), 4)).ToString();
    panel6.Visible = true;
}
else
{
    MessageBox.Show("Enter the M value to do the next step!");
}
}
}
```

## Приложение В

### Сертификат соответствия программного обеспечения

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УНИТАРНОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ  
“ВНИИМ им. Д.И.МЕНДЕЛЕЕВА”

190005, Россия, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 19

Факс: +7(812) 713-01-14, телефон: +7(812)251-76-01, e-mail: info@vniim.ru, http://www.vniim.ru

СИСТЕМА ДОБРОВОЛЬНОЙ СЕРТИФИКАЦИИ ПРОГРАММНОГО  
ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИСПОЛЪЗУЕМОГО В МЕТРОЛОГИИ  
Регистрационный № РОСС RU.В1541.04ИЖХ0 от 06 сентября 2016 г.



## СЕРТИФИКАТ СООТВЕТСТВИЯ

№ ПО ИМ – 06 – 2016  
программного обеспечения

-00007

Подтверждение соответствия программного обеспечения Thread Gages Calculation Software проведено на соответствие ГОСТ Р 8.654-2015 «ГСИ. Требования к программному обеспечению средств измерений. Основные положения»; ГОСТ Р 8.883-2015 «ГСИ. Программное обеспечение средств измерений. Алгоритмы обработки, хранения, защиты и передачи измерительной информации. Методы испытаний»; Рекомендации МИ 2174-91 «ГСИ. Аттестация алгоритмов и программ обработки данных при измерениях. Основные положения»; Р.50.2.077-2014 «Испытания средств измерений в целях утверждения типа. Проверка защиты программного обеспечения»

**Разработчик ПО и заказчик подтверждения соответствия ПО:**

ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева», отдел геометрических измерений 251,  
Адрес: 190005, Санкт-Петербург, Московский пр., д.19.

Работа по аттестации программного обеспечения была проведена с «5» декабря 2016 года по «27» декабря 2016 г. во ФГУП «ВНИИМ им. Д.И.Менделеева».

**Назначение и область применения ПО:** ПО TGCS предназначено для автоматической обработки результатов косвенных измерений среднего диаметра цилиндрических резьбовых калибров по методу трех проволок. Область применения ПО TGCS распространяется на калибры-пробки и калибры-кольца: метрической резьбы по ГОСТ 18465-73, ГОСТ 18466-73; трубной цилиндрической резьбы по ГОСТ 6357-81, ГОСТ 2533-88; трапецидальной резьбы по ГОСТ 10071-89, ГОСТ 9562-81. ПО TGCS предназначено для использования совместно с горизонтальными длиномерами модельного ряда Labconcept фирмы Trimos S.A. (Швейцария) в составе со следующими аксессуарами: набор гладких цилиндрических проволок ЗР/0.17-3.2/S6.5; набор Т-образных щупов со сферическими наконечниками TEL75.

**Идентификационные данные (признаки) ПО:**

**Версия ПО:** 1.X (где 1 – фиксированная часть номера версии, отвечающая за метрологически значимые функции, X – число, переменная часть номера версии, может меняться при внесении изменений в метрологически незначимые функции и параметры ПО).

**Уровень защиты ПО TGCS от непреднамеренных и преднамеренных изменений:** «средний»

## Продолжение приложения В

**Алгоритмы:** все расчеты, производимые ПО TGCS, осуществляются в соответствии с ГОСТ Р 8.677-2009 «ГСИ Калибры резьбовые цилиндрические. Методика поверки»

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

**ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ THREAD GAGES CALCULATION SOFTWARE СООТВЕТСТВУЕТ ТРЕБОВАНИЯМ ГОСТ Р 8.654-2015 «ГСИ. ТРЕБОВАНИЯ К ПРОГРАММНОМУ ОБЕСПЕЧЕНИЮ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ»; ГОСТ Р 8.883-2015 «ГСИ. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ. АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ, ХРАНЕНИЯ, ЗАЩИТЫ И ПЕРЕДАЧИ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ. МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ»; РЕКОМЕНДАЦИИ МИ 2174-91 «ГСИ. АТТЕСТАЦИЯ АЛГОРИТМОВ И ПРОГРАММ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ»; Р.50.2.077-2014 «ИСПЫТАНИЯ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ В ЦЕЛЯХ УТВЕРЖДЕНИЯ ТИПА. ПРОВЕРКА ЗАЩИТЫ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ».**

Заместитель директора  
ФГУП «ВНИИМ им. Д.И.Менделеева»

Кривцов Е.П.

«28» декабря 2016



М.П.

## Приложение Г.

**Приказ о включении сведений о программном обеспечении в единый реестр  
российских программ для электронных вычислительных машин и баз  
данных**

**МИНИСТЕРСТВО СВЯЗИ И МАССОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
(МИНКОМСВЯЗЬ РОССИИ)**

**ПРИКАЗ**

21.07.2017

№ 382

**О включении сведений о программном обеспечении в единый реестр  
российских программ для электронных вычислительных машин и баз  
данных**

В соответствии с пунктом 25 правил формирования и ведения единого реестра российских программ для электронных вычислительных машин и баз данных, утвержденных постановлением Правительства Российской Федерации от 16 ноября 2015 г. № 1236 «Об установлении запрета на допуск программного обеспечения, происходящего из иностранных государств, для целей осуществления закупок для обеспечения государственных и муниципальных нужд» (Собрание законодательства Российской Федерации, 2015, № 47, ст. 6600), и на основании решения Экспертного совета по российскому программному обеспечению при Министерстве связи и массовых коммуникаций Российской Федерации (далее - Экспертный совет) от 18 июля 2017 г.

**ПРИКАЗЫВАЮ:**

1. Включить сведения о программном обеспечении в реестр с присвоением класса (классов) программного обеспечения в соответствии с документами заявителя согласно приложению № 1 к настоящему приказу.
2. Включить сведения о программном обеспечении в реестр с присвоением класса (классов) программного обеспечения в соответствии с решением Экспертного совета от 18 июля 2017 г. согласно приложению № 2 к настоящему приказу.

Министр



Н.А. Никифоров

## Продолжение приложения Г

Приложение № 2  
к приказу Министерства связи  
и массовых коммуникаций  
Российской Федерации  
от 21.07.2012 № 382

п/п	Заявитель	Программное обеспечение	Регистрационный номер заявления	Класс программного обеспечения
1	Блинов Дмитрий Валерьевич	Warehouse Assistant System "BIGL"	86011	Прикладное программное обеспечение общего назначения; Системы управления процессами организации
2	ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ "АКАДЕМИЯ-МЕДИА"	Теоретические и методические основы организации продуктивных видов деятельности детей дошкольного возраста	105326	Прикладное программное обеспечение общего назначения; Системы управления процессами организации
3	Лукьянов Борис Васильевич	КОРАЛЛ	96689	Системы управления процессами организации; Системы сбора, хранения, обработки, анализа, моделирования и визуализации массивов данных; Информационные системы для решения специфических отраслевых задач
4	Москалев Андрей Андреевич	Thread Gages Calculation Software	98678	Информационные системы для решения специфических отраслевых задач
5	ЗАКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО "ФИРМА ИНТЕЛКОМ"	Интегрированная система безопасности "Купра"	99885	Системы мониторинга и управления; Информационные системы для решения специфических отраслевых задач