

---

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО  
ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

---



НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
СТАНДАРТ  
РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р  
8.644—  
2008

---

Государственная система обеспечения единства  
измерений

**МЕРЫ РЕЛЬЕФНЫЕ НАНОМЕТРОВОГО  
ДИАПАЗОНА С ТРАПЕЦЕИДАЛЬНЫМ  
ПРОФИЛЕМ ЭЛЕМЕНТОВ**

**Методика калибровки**

Издание официальное



Москва  
Стандартинформ  
2010

## Предисловие

Цели и принципы стандартизации в Российской Федерации установлены Федеральным законом от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ «О техническом регулировании», а правила применения национальных стандартов Российской Федерации — ГОСТ Р 1.0—2004 «Стандартизация в Российской Федерации. Основные положения»

### Сведения о стандарте

1 РАЗРАБОТАН Открытым акционерным обществом «Научно-исследовательский центр по изучению свойств поверхности и вакуума», Федеральным государственным учреждением «Российский научный центр «Курчатовский институт» и Государственным образовательным учреждением высшего профессионального образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)»

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 441 «Нанотехнологии и наноматериалы»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 26 августа 2008 г. № 186-ст

4 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

5 ПЕРЕИЗДАНИЕ. Февраль 2010 г.

*Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодно издаваемом информационном указателе «Национальные стандарты», а текст изменений и поправок — в ежемесячно издаваемых указателях «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ежемесячно издаваемом указателе «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет*

© Стандартинформ, 2008  
© СТАНДАРТИНФОРМ, 2010

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

## Содержание

1 Область применения . . . . .	1
2 Нормативные ссылки . . . . .	1
3 Термины и определения . . . . .	2
4 Технические требования . . . . .	3
5 Требования к квалификации калибровщиков . . . . .	4
6 Требования по обеспечению безопасности . . . . .	4
7 Подготовка к процедуре калибровки . . . . .	4
8 Процедура проведения измерений . . . . .	5
9 Обработка результатов измерений . . . . .	6
10 Оценка неопределенности измерений параметров . . . . .	8
11 Оформление результатов калибровки . . . . .	9
Приложение А (справочное) Вычисление показателя преломления воздуха . . . . .	10
Библиография . . . . .	13



## Государственная система обеспечения единства измерений

## МЕРЫ РЕЛЬЕФНЫЕ НАНОМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА С ТРАПЕЦЕИДАЛЬНЫМ ПРОФИЛЕМ ЭЛЕМЕНТОВ

## Методика калибровки

State system for ensuring the uniformity of measurements.  
Nanometer range relief measures with trapezoidal profile of elements.  
Methods for calibration

Дата введения — 2009—06—01

**1 Область применения**

Настоящий стандарт распространяется на рельефные меры нанометрового диапазона с трапецеидальным профилем элементов (далее — рельефные меры), линейные размеры и материал для изготовления которых соответствуют требованиям ГОСТ Р 8.628. Рельефные меры применяют для измерения линейных размеров в диапазоне от  $10^{-9}$  до  $10^{-6}$  м.

Настоящий стандарт устанавливает методику калибровки рельефных мер.

**2 Нормативные ссылки**

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ Р 8.628—2007 Государственная система обеспечения единства измерений. Меры рельефные нанометрового диапазона из монокристаллического кремния. Требования к геометрическим формам, линейным размерам и выбору материала для изготовления

ГОСТ Р ИСО 14644-2—2001 Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Часть 2. Требования к контролю и мониторингу для подтверждения постоянного соответствия ГОСТ Р ИСО 14644-1\*

ГОСТ Р ИСО 14644-5—2005 Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Часть 5. Эксплуатация

ГОСТ 12.1.040—83 Система стандартов безопасности труда. Лазерная безопасность. Общие положения

ГОСТ 12.2.061—81 Система стандартов безопасности труда. Оборудование производственное. Общие требования безопасности к рабочим местам

ГОСТ ИСО 14644-1—2002 Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Часть 1. Классификация чистоты воздуха

**П р и м е ч а н и е** — При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет или по ежегодно издаваемому информационному указателю «Национальные стандарты», который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по соответствующим ежемесячно издаваемым информационным указателям, опубликованным в текущем году. Если ссылочный стандарт заменен (изменен), то при пользовании настоящим стандартом следует руководствоваться заменяющим (измененным) стандартом. Если ссылочный стандарт отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, применяется в части, не затрагивающей эту ссылку.

\* ГОСТ Р ИСО 14644-1—2000 отменен, с 1 апреля 2004 г. действует ГОСТ ИСО 14644-1—2002.

### 3 Термины и определения

В настоящем стандарте применены термины по РМГ 29 [1], а также следующие термины с соответствующими определениями.

**3.1 рельеф поверхности твердого тела (рельеф поверхности):** Поверхность твердого тела, отклонения которой от идеальной плоскости обусловлены естественными причинами или специальной обработкой.

**3.2 элемент рельефа поверхности (элемент рельефа):** Пространственно локализованная часть рельефа поверхности.

**3.3 элемент рельефа в форме выступа (выступ):** Элемент рельефа, расположенный выше прилегающих к нему областей.

**3.4 геометрическая форма элемента рельефа:** Геометрическая фигура, наиболее адекватно аппроксимирующая форму минимального по площади сечения элемента рельефа.

*Пример — Трапециевидный выступ, представляющий собой элемент рельефа поверхности, геометрическая форма минимального по площади сечения которого наиболее адекватно аппроксимируется трапецией.*

**3.5 мера физической величины (мера величины):** Средство измерений, предназначенное для воспроизведения и (или) хранения физической величины одного или нескольких заданных размеров, значения которых выражены в установленных единицах и известны с необходимой точностью [1].

**3.6 рельефная мера:** Средство измерений длины, представляющее собой твердый объект, линейные размеры элементов рельефа которого установлены с необходимой точностью.

*Примечание — Рельефная мера может быть изготовлена с помощью средств микро- и нанотехнологии или представляет собой специально обработанный объект естественного происхождения.*

**3.7 рельефная мера нанометрового диапазона:** Мера, содержащая элементы рельефа, линейный размер хотя бы одного из которых менее  $10^{-6}$  м.

**3.8 рельефная мера нанометрового диапазона с трапециевидным профилем элементов (рельефная мера):** Рельефная мера нанометрового диапазона, геометрическая форма элементов рельефа которой представляет собой трапецию.

**3.9 пиксель:** Наименьший дискретный элемент изображения, получаемый в результате математической обработки информативного сигнала.

**3.10 сканирование элемента исследуемого объекта (сканирование):** Перемещение зонда микроскопа над выбранным элементом рельефа поверхности исследуемого объекта (или перемещение исследуемого объекта под зондом) с одновременной регистрацией информативного сигнала.

**3.11 изображение на экране монитора микроскопа (видеоизображение):** Изображение на экране монитора микроскопа в виде матрицы из  $l$  строк по  $m$  пикселей в каждой, яркость которых прямо пропорциональна значению сигнала соответствующей точки матрицы.

*Примечание — Яркость пикселя определяется силой света, излучаемой им в направлении глаза наблюдателя.*

**3.12 видеопрофиль информативного сигнала (видеопрофиль):** Графическая зависимость значения информативного сигнала, поступающего с детектора микроскопа, от номера пикселя в данной строке видеоизображения.

**3.13 масштабный коэффициент видеоизображения микроскопа (масштабный коэффициент):** Отношение длины исследуемого элемента на объекте измерений к числу пикселей этого элемента на видеоизображении.

*Примечание — Масштабный коэффициент определяют для каждого микроскопа.*

**3.14 Z-сканер сканирующего зондового атомно-силового микроскопа (Z-сканер):** Устройство сканирующего зондового атомно-силового микроскопа, позволяющее в процессе сканирования перемещать зонд над поверхностью исследуемого объекта (или перемещать исследуемый объект под зондом) в вертикальном направлении.

**3.15 неопределенность измерений (неопределенность):** Параметр, связанный с результатом измерений и характеризующий рассеяние значений, которые можно приписать измеряемой величине [1].

3.16 **стандартная неопределенность:** Неопределенность результата измерений, выраженная в виде среднеквадратического отклонения.

3.17 **суммарная стандартная неопределенность:** Стандартная неопределенность результата измерений, полученного путем использования значений других величин, равная положительному квадратному корню суммы членов, являющихся дисперсиями или ковариациями этих величин, взвешенными в соответствии с тем, как результат измерений изменяется при изменении этих величин.

## 4 Технические требования

### 4.1 Требования к неопределенностям измерений параметров, определяемых в процессе калибровки

4.1.1 Суммарная стандартная неопределенность измерения высоты выступа калибруемого элемента рельефа должна быть не более 2 нм.

4.1.2 Суммарная стандартная неопределенность измерения ширины верхнего основания выступа калибруемого элемента рельефа должна быть не более 2 нм.

4.1.3 Суммарная стандартная неопределенность измерения ширины нижнего основания выступа калибруемого элемента рельефа должна быть не более 2 нм.

4.1.4 Суммарная стандартная неопределенность измерения проекции наклонной стенки на плоскость нижнего основания выступа калибруемого элемента рельефа должна быть не более 1 нм.

### 4.2 Требования к средствам калибровки и вспомогательному оборудованию

4.2.1 Калибровку рельефной меры проводят с помощью:

- сканирующего зондового атомно-силового микроскопа;
- двух лазерных двухлучевых интерферометров с источником излучения — гелий-неоновым лазером, длина волны которого стабилизирована по линии насыщенного поглощения в молекулярном йоде и определена с относительной погрешностью не более  $3 \cdot 10^{-7}$ . В комплект поставки каждого лазерного интерферометра должны входить два зеркала, предназначенные для формирования опорного и информативного лучей, по фазовому сдвигу  $\Delta\phi$  между которыми определяют перемещение калибруемого элемента рельефа в процессе его сканирования атомно-силовым микроскопом. Абсолютная погрешность определения фазового сдвига  $\Delta\phi$  — не более 0,002 рад.

4.2.2 В качестве вспомогательного оборудования применяют оптический микроскоп с увеличением не менее 400 $\times$ , а также средства измерений параметров окружающей среды с абсолютными погрешностями не более:

- температуры окружающей среды . . . . .  $\pm 0,2$  °C;
- относительной влажности воздуха . . . . .  $\pm 3$  %;
- атмосферного давления . . . . .  $\pm 130$  Па.

4.2.3 Допускается применять другие средства калибровки, точность которых соответствует требованиям настоящего стандарта.

### 4.3 Требования к условиям проведения калибровки

4.3.1 Калибровку рельефной меры проводят в следующих условиях:

- температура окружающей среды . . . . .  $(20 \pm 3)$  °C;
- относительная влажность воздуха . . . . . не более 80 %;
- атмосферное давление . . . . .  $(100 \pm 4)$  кПа;
- напряжение питающей сети . . . . .  $220^{+22}_{-33}$  В,
- частота питающей сети . . . . .  $50^{+10}_{-10}$  Гц.

Разность значений параметров окружающей среды до и после окончания калибровки не должна превышать указанных в приложении А.

4.3.2 Помещение (зона), в котором размещают средства измерений для калибровки рельефных мер, должно быть в эксплуатируемом состоянии и обеспечивать класс чистоты не более класса 8 ИСО по взвешенным в воздухе частицам размерами 0,5 и 5 мкм и концентрациями, определенными по ГОСТ ИСО 14644-1. Периодичность контроля состояния помещения (зоны) определяют по ГОСТ Р ИСО 14644-2. Эксплуатацию помещения (зоны) осуществляют по ГОСТ Р ИСО 14644-5.

## 5 Требования к квалификации калибровщиков

Калибровку рельефных мер должны проводить штатные сотрудники метрологической службы предприятия, аккредитованной в установленном порядке на проведение калибровочных работ по [2]. Сотрудники должны иметь высшее образование, профессиональную подготовку, опыт работы с атомно-силовыми микроскопами (далее — АСМ) и двухлучевыми лазерными гетеродинами интерферометрами и знать требования настоящего стандарта.

Рабочие места калибровщиков должны быть аттестованы по условиям труда в соответствии с требованиями трудового законодательства.

## 6 Требования по обеспечению безопасности

При калибровке рельефных мер необходимо соблюдать правила электробезопасности по [3], [4], требования лазерной безопасности по ГОСТ 12.1.040 и требования по обеспечению безопасности на рабочих местах по ГОСТ 12.2.061, [5], [6].

## 7 Подготовка к процедуре калибровки

7.1 Подготовку к процедуре калибровки рельефной меры начинают с проверки документации и внешнего осмотра, в процессе которого должно быть установлено:

- соответствие комплекта поставки данным, приведенным в паспорте (формуляре) на рельефную меру;
- отсутствие механических повреждений футляра, в котором осуществлялось хранение и транспортирование рельефной меры.

7.2 Рельефную меру извлекают из футляра, проводят предварительный визуальный внешний осмотр для выявления возможных повреждений и с помощью специальных зажимов устанавливают меру на рабочий стол АСМ.

При установке рельефной меры необходимо обеспечить:

- параллельность плоскости, образованной геометрической формой элемента рельефа меры, направлению горизонтального перемещения рабочего стола АСМ;
- плотное прилегание плоскости подложки меры к поверхности рабочего стола АСМ.

7.3 С помощью вспомогательного оптического микроскопа осматривают и проверяют качество поверхности рельефной меры. Шаговая структура на поверхности меры должна быть однородной, при этом на примерно 75 % поверхности меры не должно быть повреждений маркерных линий, искажений краев элементов рельефа в виде впадин и выступов, соизмеримых с шириной элементов рельефа.

7.4 С помощью вспомогательного оптического микроскопа устанавливают зонд АСМ в положение, соответствующее началу сканирования калибруемого элемента рельефной меры.

Начальное положение определяют следующим образом: зонд АСМ устанавливают на плоскость нижнего основания на расстоянии от калибруемого элемента, равном не менее 20 % и не более 50 % ширины нижнего основания выступа калибруемого элемента. Аналогично определяют конечное положение зонда АСМ при сканировании.

7.5 На неподвижном элементе в камере образцов АСМ устанавливают зеркало лазерного интерферометра, предназначенное для формирования опорного луча, а на рабочем столе АСМ — другое зеркало, предназначенное для формирования информативного луча. Лазерный интерферометр (далее — горизонтальный лазерный интерферометр) располагают вдоль оси, совпадающей с горизонтальным направлением сканирования (далее — ось абсцисс).

Второй комплект зеркал устанавливают на Z-сканере и на неподвижном элементе камеры образцов АСМ. Эти зеркала предназначены для формирования информативного (на Z-сканере) и опорного (на неподвижном элементе камеры) лучей, что позволяет регистрировать перемещение Z-сканера АСМ в вертикальном направлении сканирования (далее — ось ординат).

Второй лазерный интерферометр (далее — вертикальный лазерный интерферометр) устанавливают в соответствии с расположением зеркал.

Горизонтальный и вертикальный лазерные интерферометры должны обеспечивать регистрацию информативных и опорных лучей в процессе сканирования выступа калибруемого элемента. Для каждого интерферометра в процессе сканирования необходимо также обеспечить взаимную параллельность информативного и опорного лучей при всех положениях стола и Z-сканера АСМ. Допустимый



угол расхождения опорного и информативного лучей для каждого интерферометра не должен превышать  $1'$ .

Такое взаимное расположение двух лазерных интерферометров в комплекте с зеркалами позволяет в процессе сканирования выступа калибруемого элемента рельефной меры проводить регистрацию видеопрофиля элемента и одновременную регистрацию перемещения рельефной меры и Z-сканера с помощью двух лазерных интерферометров.

7.6 В соответствии с инструкцией по эксплуатации АСМ проводят пробное сканирование калибруемого элемента рельефа меры.

При этом предварительно:

- выполняют юстировку зеркал в соответствии с инструкциями по эксплуатации лазерных интерферометров;
- путем изменения угла наклона исследуемого объекта обеспечивают взаимную параллельность направления прохождения информативного луча вертикального лазерного интерферометра и направления вертикального перемещения Z-сканера АСМ при сканировании элемента рельефа;
- в соответствии с инструкциями по эксплуатации АСМ и лазерных интерферометров определяют частоту и скорость сканирования калибруемого элемента, при которой в электронно-фазометрических системах интерферометров можно четко регистрировать количество целых и дробных полос интерференции, соответствующих значениям фазовых сдвигов между опорными и информативными лучами горизонтального и вертикального интерферометров;
- устанавливают показания электронно-фазометрических систем всех лазерных интерферометров в «нулевое» положение, определяемое нестабильностью младшего разряда используемых аналого-цифровых преобразователей в указанных электронно-фазометрических системах.

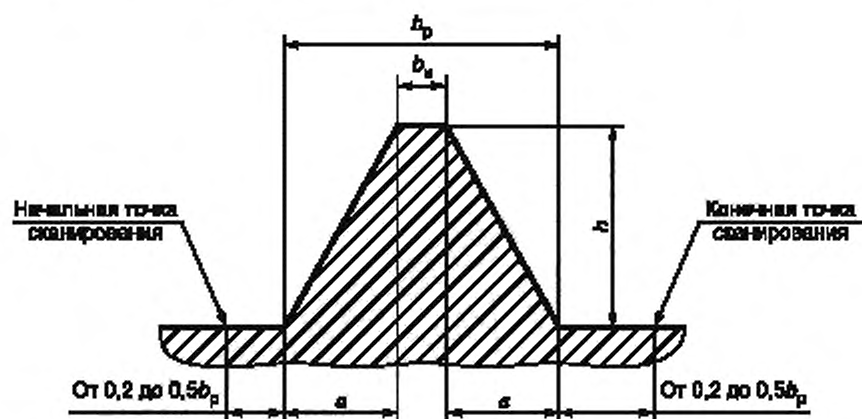
## 8 Процедура проведения измерений

8.1 Проводят измерения параметров окружающей среды и показателей качества питающей электрической сети и проверяют выполнение требований, указанных в 4.3.1.

8.2 В соответствии с инструкциями по эксплуатации АСМ и лазерных интерферометров проводят сканирование выступа калибруемого элемента рельефной меры. Одновременно с помощью лазерных интерферометров проводят измерения горизонтального перемещения подвижной части рабочего стола АСМ и вертикального перемещения Z-сканера АСМ.

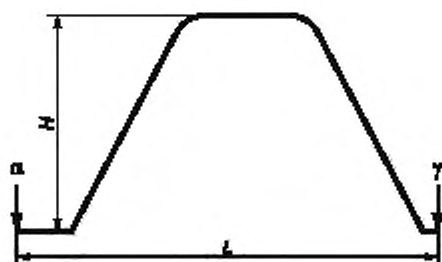
Сечение выступа трапециевидальной формы и места начального и конечного положений зонда АСМ приведены на рисунке 1.

Видеопрофиль, соответствующий этому выступу, представлен на рисунке 2.



$b_p$  — ширина нижнего основания выступа,  $b_n$  — ширина верхнего основания выступа;  $h$  — высота выступа;  $a$  — значение проекции наклонной стенки на плоскость нижнего основания выступа

Рисунок 1 — Сечение калибруемого элемента рельефной меры



$a$  — точка на видеопрофиле, соответствующая началу сканирования;  $y$  — точка на видеопрофиле, соответствующая концу сканирования;  $H$  — высота выступа, измеренная по видеопрофилю;  $L$  — разность абсцисс конечной и начальной точек горизонтального сканирования, соответствующая значению горизонтального перемещения подвижной части рабочего стола АСМ, вычисленная по видеопрофилю

Рисунок 2 — Видеопрофиль сечения калибруемого элемента рельефной меры, приведенного на рисунке 1 (направление сканирования — слева направо)

8.3 По показаниям электронно-фазометрической системы горизонтального лазерного интерферометра определяют значение горизонтального фазового сдвига  $\Delta\Phi_r$  в радианах между информативным и опорным лучами этого интерферометра.

8.4 По показаниям электронно-фазометрической системы вертикального лазерного интерферометра определяют значение вертикального фазового сдвига  $\Delta\Phi_v$  в радианах между информативным и опорным лучами этого интерферометра.

8.5 Проводят измерения параметров окружающей среды и показателей качества питающей электрической сети и проверяют выполнение требований, указанных в 4.3.1.

8.6 Результаты измерений параметров рельефной меры по 8.2—8.4, а также указанных на рисунке 2 оформляют в виде протокола. Также в протоколе приводят значения условий проведения калибровки до начала и после окончания измерений по 8.1 и 8.5.

Форма протокола — произвольная. Протокол с результатами калибровки должен храниться как минимум до следующей калибровки рельефной меры.

## 9 Обработка результатов измерений

### 9.1 Вычисление горизонтального перемещения подвижной части рабочего стола АСМ при сканировании калибруемого элемента

Горизонтальное перемещение подвижной части рабочего стола  $\Delta L$ , мм, от начального до конечного положения при сканировании выступа элемента рельефа вычисляют по формуле

$$\Delta L = \frac{\lambda_1}{4\pi n} \Delta\Phi_r,$$

где  $\lambda_1$  — длина волны излучения гелий-неонового лазера в вакууме, приведенная в паспорте (формуляре) на горизонтальный лазерный интерферометр, мм;

$\Delta\Phi_r$  — фазовый сдвиг, измеренный по 8.3, рад;

$n$  — показатель преломления воздуха при фактических значениях температуры окружающей среды, влажности воздуха и атмосферного давления, вычисленный по приложению А.

### 9.2 Вычисление масштабного коэффициента видеоизображения для оси абсцисс

Масштабный коэффициент видеоизображения  $m$ , мм/пиксель, для оси абсцисс вычисляют по формуле

$$m = \frac{\Delta L}{L},$$

где  $\Delta L$  — перемещение подвижной части рабочего стола АСМ при горизонтальном сканировании, вычисленное по 9.1, мм;

$L$  — разность абсцисс конечной и начальной точек горизонтального сканирования, соответствующая горизонтальному перемещению подвижной части рабочего стола АСМ, вычисленная по видеопрофилю (см. рисунок 2), пиксель.

### 9.3 Вычисление вертикального перемещения Z-сканера ACM при сканировании калибруемого элемента

Вертикальное перемещение Z-сканера ACM  $\Delta H$ , нм, при сканировании выступа элемента рельефа вычисляют по формуле

$$\Delta H = \frac{\lambda_2}{4\pi n} \Delta\Phi_n,$$

где  $\lambda_2$  — длина волны излучения гелий-неонового лазера в вакууме, приведенная в паспорте (формуляре) на вертикальный лазерный интерферометр, нм;

$\Delta\Phi_n$  — фазовый сдвиг, измеренный по 8.4, рад;

$n$  — показатель преломления воздуха при фактических значениях температуры окружающей среды, влажности воздуха и атмосферного давления, вычисленный по приложению А.

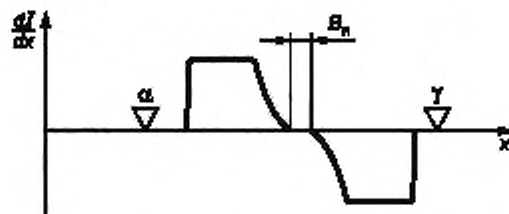
### 9.4 Вычисление высоты выступа калибруемого элемента рельефа

Значение высоты выступа  $h$  в нанометрах равно значению вертикального перемещения Z-сканера  $\Delta H$ , вычисленному по 9.3.

### 9.5 Вычисление вспомогательной величины для определения ширины верхнего основания выступа калибруемого элемента рельефа

При определении ширины верхнего основания трапециевидального выступа  $b_n$  используют вспомогательную величину, для вычисления которой:

- вычисляют производную по горизонтальной координате. Для видеопрофиля, изображенного на рисунке 2, результат такого вычисления указан на рисунке 3;
- проводят анализ результатов вычисления производной видеопрофиля по координате и вычисляют вспомогательную величину  $B_n$  в пикселях, которая равна разности соответствующих абсцисс точек, как изображено на рисунке 3.



$x$  — ось абсцисс по 7.5;  $\alpha, \gamma$  — начальная и конечная точки положения зонда ACM при сканировании калибруемого элемента, расположенные в соответствии с требованиями 7.4;  $\frac{dI}{dx}$  — ось ординат значений производной величины видеосигнала по координате  $x$ .

Рисунок 3 — Графическое изображение первой производной видеопрофиля по координате в направлении горизонтального перемещения подвижной части стола ACM

### 9.6 Вычисление ширины верхнего основания трапециевидального выступа

Ширину верхнего основания выступа  $b_n$ , нм, вычисляют по формуле

$$b_n = mB_n,$$

где  $m$  — масштабный коэффициент видеоизображения для оси абсцисс, вычисленный по 9.2, нм/пиксель;

$B_n$  — вспомогательная величина, вычисленная по 9.5, пиксель.

### 9.7 Вычисление ширины нижнего основания трапециевидального выступа

Ширину нижнего основания трапециевидального выступа  $b_p$ , нм, вычисляют по формуле

$$b_p = b_n + 1,4142h,$$

где  $b_n$  — ширина верхнего основания калибруемого выступа, вычисленная по 9.6, нм;

$h$  — высота калибруемого выступа, вычисленная по 9.4, нм.

**9.8 Вычисление проекции наклонной стенки на плоскость нижнего основания выступа**

Проекцию наклонной стенки на плоскость нижнего основания выступа  $a$ , мм, вычисляют по формуле

$$a = 0.7071h,$$

где  $h$  — высота выступа, вычисленная по 9.4, мм.

**10 Оценка неопределенности измерений параметров**

10.1 При оценке суммарной стандартной неопределенности  $u_c(\Delta L)$  горизонтального перемещения подвижной части рабочего стола  $\Delta L$  пренебрегают неопределенностью в значении показателя преломления воздуха  $n$ , вычисленного по приложению А, и неопределенностью в значении длины волны излучения гелий-неонового лазера в вакууме горизонтального лазерного интерферометра  $\lambda_1$ . Значение  $u_c(\Delta L)$  вычисляют по формуле

$$u_c(\Delta L) = \frac{\lambda_1}{4\pi n} u_c(\Delta\Phi_a),$$

где  $\lambda_1$  — длина волны излучения гелий-неонового лазера в вакууме, приведенная в паспорте (формуляре) на горизонтальный лазерный интерферометр, мм;

$u_c(\Delta\Phi_a)$  — суммарная стандартная неопределенность измерения фазового сдвига, приведенная в паспорте (формуляре) на горизонтальный лазерный интерферометр, рад;

$n$  — показатель преломления воздуха при фактических значениях температуры окружающей среды, влажности воздуха и атмосферного давления, вычисленный по приложению А.

**Примечание** — Если в паспорте (формуляре) на горизонтальный лазерный интерферометр приведена абсолютная погрешность измерения фазового сдвига, то вычисление  $u_c(\Delta\Phi_a)$  осуществляют по [7].

10.2 При оценке суммарной стандартной неопределенности  $u_c(\Delta H)$  вертикального перемещения Z-сканера АСМ  $\Delta H$  пренебрегают неопределенностью значения показателя преломления воздуха  $n$ , вычисленного по приложению А, и неопределенностью значения длины волны излучения гелий-неонового лазера в вакууме вертикального лазерного интерферометра  $\lambda_2$ . Значение  $u_c(\Delta H)$ , мм, вычисляют по формуле

$$u_c(\Delta H) = \frac{\lambda_2}{4\pi n} u_c(\Delta\Phi_b),$$

где  $\lambda_2$  — длина волны излучения гелий-неонового лазера в вакууме, приведенная в паспорте (формуляре) на вертикальный лазерный интерферометр, мм;

$u_c(\Delta\Phi_b)$  — суммарная стандартная неопределенность измерения фазового сдвига, приведенная в паспорте (формуляре) на вертикальный лазерный интерферометр, рад;

$n$  — показатель преломления воздуха при фактических значениях температуры окружающей среды, влажности воздуха и атмосферного давления, вычисленный по приложению А.

**Примечание** — Если в паспорте (формуляре) на вертикальный лазерный интерферометр приведена абсолютная погрешность измерения фазового сдвига, то вычисление  $u_c(\Delta\Phi_b)$  осуществляют по [7].

10.3 Суммарную стандартную неопределенность  $u_c(m)$ , мм/пиксель, измерения масштабного коэффициента видеоизображения для оси абсцисс  $m$  вычисляют по формуле

$$u_c(m) = m \sqrt{\left(\frac{u_c(\Delta L)}{\Delta L}\right)^2 + \left(\frac{u(L)}{L}\right)^2},$$

где  $m$  — масштабный коэффициент видеоизображения для оси абсцисс, вычисленный по 9.2, мм/пиксель;

$u_c(\Delta L)$  — суммарная стандартная неопределенность измерения горизонтального перемещения подвижной части рабочего стола, вычисленная по 10.1, мм;

$\Delta L$  — горизонтальное перемещение подвижной части рабочего стола, вычисленное по 9.1, мм;

$u(L)$  — стандартная неопределенность разности абсцисс конечной и начальной точек горизонтального сканирования, соответствующая горизонтальному перемещению подвижной части рабочего стола АСМ, пиксель;

$L$  — разность абсцисс конечной и начальной точек горизонтального сканирования, соответствующая горизонтальному перемещению подвижной части рабочего стола АСМ, пиксель.

Примечание — При равномерном квантовании видеосигнала значение  $u(L)$  принимают равным 0,5 пиксель.

10.4 Значение суммарной стандартной неопределенности  $u_c(h)$  в нанометрах при измерении высоты выступа  $h$  равно значению суммарной стандартной неопределенности  $u_c(\Delta H)$  вертикального перемещения Z-сканера АСМ  $\Delta H$ , вычисленного по 10.2.

10.5 Суммарную стандартную неопределенность  $u_c(b_n)$ , нм, измерения ширины верхнего основания трапецидального выступа  $b_n$  вычисляют по формуле

$$u_c(b_n) = b_n \sqrt{\left(\frac{u_c(m)}{m}\right)^2 + \left(\frac{u(B_n)}{B_n}\right)^2},$$

где  $b_n$  — ширина верхнего основания трапецидального выступа, вычисленная по 9.6, нм;  
 $u_c(m)$  — суммарная стандартная неопределенность измерения масштабного коэффициента видеоизображения для оси абсцисс, нм/пиксель;  
 $m$  — масштабный коэффициент видеоизображения для оси абсцисс, вычисленный по 9.2, нм/пиксель;  
 $u(B_n)$  — стандартная неопределенность измерения вспомогательной величины для определения ширины верхнего основания выступа  $B_n$ , вычисленной по 9.5, пиксель;  
 $B_n$  — вспомогательная величина для определения ширины верхнего основания выступа, вычисленная по 9.5, пиксель.

Примечание — При равномерном квантовании видеосигнала значение  $u(B_n)$  принимают равным 0,5 пиксель.

10.6 Суммарную стандартную неопределенность  $u_c(b_p)$ , нм, измерения ширины нижнего основания трапецидального выступа  $b_p$  вычисляют по формуле

$$u_c(b_p) = \sqrt{u_c^2(b_n) + 2u_c^2(h)},$$

где  $u_c(b_n)$  — суммарная стандартная неопределенность измерения ширины верхнего основания выступа, вычисленная по 10.5, нм;  
 $u_c(h)$  — суммарная стандартная неопределенность измерения высоты выступа, вычисленная по 10.4, нм.

10.7 Суммарную стандартную неопределенность  $u_c(a)$ , нм, измерения проекции наклонной стенки на плоскость нижнего основания выступа вычисляют по формуле

$$u_c(a) = 0,7071 u_c(h),$$

где  $u_c(h)$  — суммарная стандартная неопределенность измерения высоты выступа, вычисленная по 10.4, нм.

## 11 Оформление результатов калибровки

11.1 Результаты калибровки оформляют в виде сертификата установленной формы [8] с соответствующей записью в паспорте (формуляре) рельефной меры.

11.2 В сертификате калибровки и в паспорте (формуляре) рельефной меры должны быть приведены значения высоты выступа, ширины верхнего и нижнего его оснований, а также значение проекции наклонной стенки на плоскость нижнего основания выступа калибруемого элемента. Для перечисленных метрологических характеристик рельефной меры необходимо также указать значения неопределенностей, вычисленных по разделу 10 настоящего стандарта.

**Приложение А**  
**(справочное)**

**Вычисление показателя преломления воздуха**

**А.1 Исходные данные**

При вычислении показателя преломления воздуха  $n$  исходными данными являются следующие параметры окружающей среды:

- температура  $t$ , °C;
- атмосферное давление  $p$ , Па;
- относительная влажность  $\varphi$ , %.

Параметры окружающей среды измеряют до начала и после окончания измерений, при этом разность показаний должна быть не более:

- температуры окружающей среды . . . . .  $\pm 1$  °C;
- атмосферного давления, . . . . .  $\pm 300$  Па;
- относительной влажности воздуха . . . . .  $\pm 10$  %.

**А.2 Константы для вычисления показателя преломления воздуха**

При вычислениях используют константы, приведенные в таблице А.1.

Т а б л и ц а А.1 — Константы для вычисления показателя преломления воздуха

Обозначение константы	Значение	Обозначение константы	Значение
<i>A</i>	8342,54	<i>E</i>	0,601
<i>B</i>	2406147	<i>F</i>	0,00972
<i>C</i>	15998	<i>G</i>	0,003661
<i>D</i>	96095,43	—	—

**А.3 Вычисление вспомогательной величины  $S$**

Вспомогательную величину  $S$  вычисляют по формуле

$$S = \frac{4 \cdot 10^5}{(\lambda_1 + \lambda_2)^2},$$

где  $\lambda_1, \lambda_2$  — значения длин волн излучения в вакууме гелий-неоновых лазеров по 9.1 и 9.3, нм, соответственно.

**А.4 Вычисление вспомогательной величины  $n_s$**

Вспомогательную величину  $n_s$  вычисляют по формуле

$$n_s = 1 + 10^{-8} \left\{ A + \frac{B}{130 - S} + \frac{C}{389 - S} \right\},$$

где  $A, B, C$  — константы по А.2;

$S$  — вспомогательная величина, вычисленная по А.3.

**А.5 Вычисление вспомогательной величины  $X$**

Вспомогательную величину  $X$  вычисляют по формуле

$$X = \frac{1 + 10^{-8}(E - Ft)p}{1 + Gt},$$

где  $E, F, G$  — константы по А.2;

$t$  — температура окружающей среды, °C;

$p$  — атмосферное давление, Па.

**A.6 Вычисление вспомогательной величины  $n_1$** 

Вспомогательную величину  $n_1$  вычисляют по формуле

$$n_1 = 1 + \frac{p(n_s - 1)X}{D},$$

где  $p$  — атмосферное давление, Па;

$n_s$  — вспомогательная величина, вычисленная по A.4;

$X$  — вспомогательная величина, вычисленная по A.5;

$D$  — константа по A.2.

**A.7 Вычисление парциального давления паров воды**

Парциальное давление паров воды  $p_w$ , Па, вычисляют по формуле

$$p_w = \frac{p}{100} p_{sw}(t),$$

где  $p$  — относительная влажность воздуха, %;

$p_{sw}(t)$  — давление насыщенного водяного пара при температуре окружающей среды  $t$ , вычисленное по A.8 — A.14, Па.

**A.8 Константы для вычисления давления насыщенного водяного пара**

Для вычисления давления насыщенного водяного пара при температуре окружающей среды  $t$  в градусах Цельсия используют константы, приведенные в таблице A.2.

Т а б л и ц а A.2 — Константы для вычисления давления насыщенного водяного пара

Обозначение константы	Значение	Обозначение константы	Значение
$K_1$	1167,05214528	$K_6$	14,9151086135
$K_2$	- 724213,167032	$K_7$	- 4823,26573616
$K_3$	- 17,0738469401	$K_8$	405113,405421
$K_4$	12020,8247025	$K_9$	- 23,8555575678
$K_5$	- 3232555,03223	$K_{10}$	650,175348448

**A.9 Вычисление вспомогательной величины  $\Omega$** 

Вспомогательную величину  $\Omega$  вычисляют по формуле

$$\Omega = t + 273,15 + \frac{K_9}{t + 273,15 - K_{10}},$$

где  $t$  — температура окружающей среды, °C;

$K_9, K_{10}$  — константы по A.8.

**A.10 Вычисление вспомогательной величины  $M$** 

Вспомогательную величину  $M$  вычисляют по формуле

$$M = \Omega^2 + K_1\Omega + K_2,$$

где  $\Omega$  — вспомогательная величина, вычисленная по A.9,

$K_1, K_2$  — константы по A.8.

**A.11 Вычисление вспомогательной величины  $N$** 

Вспомогательную величину  $N$  вычисляют по формуле

$$N = K_3\Omega^2 + K_4\Omega + K_5,$$

где  $K_3, K_4, K_5$  — константы по A.8;

$\Omega$  — вспомогательная величина, вычисленная по A.9.

**A.12 Вычисление вспомогательной величины  $R$** 

Вспомогательную величину  $R$  вычисляют по формуле

$$R = K_6\Omega^2 + K_7\Omega + K_8,$$

где  $K_6, K_7, K_8$  — константы по A.8,

$\Omega$  — вспомогательная величина, вычисленная по A.9.



**А.13 Вычисление вспомогательной величины  $W$** 

Вспомогательную величину  $W$  вычисляют по формуле

$$W = -N + \sqrt{N^2 - 4MR},$$

где  $N$  — вспомогательная величина, вычисленная по А.11;

$M$  — вспомогательная величина, вычисленная по А.10;

$R$  — вспомогательная величина, вычисленная по А.12.

**А.14 Вычисление давления насыщенного водяного пара**

Давление насыщенного водяного пара  $p_{sw}(t)$ , Па, вычисляют по формуле

$$p_{sw}(t) = 10^5 \left( \frac{2R}{W} \right)^4.$$

где  $R$  — вспомогательная величина, вычисленная по А.12;

$W$  — вспомогательная величина, вычисленная по А.13.

**А.15 Вычисление показателя преломления воздуха**

Показатель преломления воздуха  $n$  вычисляют по формуле

$$n = n_1 - 10^{-10} \frac{292,75(3,7345 - 0,0401S)p_w}{t - 273,15},$$

где  $n_1$  — вспомогательная величина, вычисленная по А.6;

$S$  — вспомогательная величина, вычисленная по А.3;

$p_w$  — парциальное давление паров воды, вычисленное по А.7, Па;

$t$  — температура окружающей среды, °C.



## Библиография

- [1] РМГ 29—99 Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения
- [2] ПР 50.2.018—95 Государственная система обеспечения единства измерений. Порядок аккредитации метрологических служб юридических лиц на право проведения калибровочных работ
- [3] Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей (утверждены приказом Минэнерго России от 13.01.2003 г. № 6, зарегистрированы Минюстом России 22.01.2003 г., рег. № 4145)
- [4] ПОТ РМ-016—2001 Межотраслевые правила по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок  
РД 153.34.0-03.150—00
- [5] СанПиН 2.2.4.1191—03 Электромагнитные поля в производственных условиях
- [6] СанПиН 2.2.2/2.4.1340—03 Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы
- [7] РМГ 43—2001 Государственная система обеспечения единства измерений. Применение «Руководства по выражению неопределенности измерений»
- [8] ПР 50.2.016—94 Государственная система обеспечения единства измерений. Требования к выполнению калибровочных работ

Ключевые слова: рельефные меры нанометрового диапазона с трапецеидальным профилем элементов, сканирующий зондовый атомно-силовой микроскоп, лазерный интерферометр, методика калибровки

Редактор *Н.В. Таланова*  
Технический редактор *Н.С. Гришанова*  
Корректор *М.С. Кабашова*  
Компьютерная верстка *Л.А. Круговой*

Подписано в печать 26.03.2010. Формат 60 × 84  $\frac{1}{8}$ . Бумага офсетная. Гарнитура Ариал.  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 2,32. Уч.-изд. л. 1,50. Тираж 53 экз. Зак. 232.

---

ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 123995 Москва, Гранатный пер., 4.  
[www.gostinfo.ru](http://www.gostinfo.ru) [info@gostinfo.ru](mailto:info@gostinfo.ru)

Набрано во ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ» на ПЭВМ.

Отпечатано в филиале ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ» — тип. «Московский печатник», 105062 Москва, Лялин пер., 6.

