



**ЕВРОПЕЙСКАЯ
ОРГАНИЗАЦИЯ
ПО АККРЕДИТАЦИИ**

EA-4/02 М:2013

Оценка неопределенности измерения при калибровках

Цель

Целью данного документа является приведение в соответствие системы оценки неопределенности измерения при калибровках в EA для определения конкретных требований, помимо общих требований EA, к отчетности по неопределенности измерений в сертификатах по калибровке, выданных аккредитованными калибровочными лабораториями, и для оказания помощи органам по аккредитации с подробным описанием возможностей по калибровке и измерению для аккредитованных калибровочных лабораторий. Так как приведенные в данном документе правила соответствуют как политике ИАС по неопределенности в калибровках, так и рекомендациям Руководства по выражению неопределенности измерения, внедрение документа EA-4/02 также будет способствовать принятию результатов европейского исследования по неопределенности на мировом уровне.

Авторство

Данный документ был подготовлен Лабораторным комитетом ЕА.

Официальный язык

В случае необходимости данный текст можно переводить на другие языки. Приоритет будет отдаваться варианту на английском языке.

Авторское право

Авторские права по данной публикации принадлежат ЕА. Данный текст нельзя распространять для перепродажи.

Дальнейшая информация

Для получения дальнейшей информации по данной публикации вы можете связаться с вашим национальным представителем ЕА. Список представителей можно найти на нашем интернет-сайте: www.european-accreditation.org.

Категория: заявочные документы и рабочие документы для органов по оценке соответствия.

EA-4/02 – это документ, обязательный для использования.

Дата утверждения: 18 октября 2013 года

Дата внедрения: немедленно

Промежуточный период: нет

Содержание

1. Введение
2. Краткое описание и определения
3. Оценка неопределенности измерения входных значений
4. Расчет стандартной неопределенности выходного значения
5. Расширенная неопределенность измерения
6. Пошаговая процедура расчета неопределенности измерения
7. Используемая литература

ПРИЛОЖЕНИЕ А

ПРИЛОЖЕНИЕ В

ПРИЛОЖЕНИЕ С

ПРИЛОЖЕНИЕ D

ПРИЛОЖЕНИЕ E

Дополнение 1

Дополнение 2

1. Введение

1.1 В данном документе определяются принципы и требования к оценке неопределенности измерения по калибровкам и положение по неопределенности в свидетельствах калибровки на основании политики ILAC по неопределенности в калибровках в соответствии с документом ILAC P14 [п.5]. Оба документа - ILAC-P14 и EA-4/02 – являются обязательными для органов по аккредитации, входящих в состав EA. Для охвата всех областей калибровки определения даны на самом общем уровне. Для удобства использования информации описанный метод можно дополнить более конкретными рекомендациями по различным областям. При разработке данных дополнительных рекомендаций для обеспечения соответствия по различным областям необходимо следовать общим принципам, описанным в данном документе.

1.2 В данном документе определения даны в соответствии с JCGM 100:2008, документом по оценке данных по измерению – Руководством по выражению неопределенности измерения (GUM 1995 с незначительными изменениями). Данный документ был подготовлен Объединенным комитетом по метрологии, в состав которого вошли BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP и OIML. Но, принимая во внимание, что в данном документе определяются общие правила по оценке и выражению неопределенности в измерении, которые можно использовать в большинстве направлений физических измерений, особое внимание здесь уделяется методу, который больше всего подходит для измерения в калибровочных лабораториях и в котором описывается однозначный и систематизированный способ оценки и определения неопределенности измерения. Однако приемлемыми являются и другие подходы, предложенные GUM (как, например, метод Монте Карло). Данный метод включает в себя:

- основные для документа определения;
- методы оценки неопределенности измерения входных величин;
- отношение между неопределенностью измерения выходной величины и рассчитанной неопределенностью измерения входных величин;
- расширенную неопределенность измерения выходной величины;
- положение неопределенности измерения;
- пошаговую процедуру расчета неопределенности измерения.

Оценка неопределенности калибровок также охвачена в нескольких руководствах по калибровке Euramet. Их можно посмотреть на интернет-сайте www.euramet.org.

2. Краткое описание и определения

Примечание: Особенно важные термины в контексте всего документа при первом упоминании выделены полужирным. В Приложении В приведен глоссарий данных терминов вместе с указанием на соответствующий раздел.

2.1. Определение результата измерения является завершенным только в том случае, если в нем указано значение измеряемой величины и неопределенности измерения данного значения. Все величины в данном документе, которые не известны точно, считаются **случайными переменными**, в том числе влияющие величины, которые могут оказать воздействие на результат измерения.

2.2. Неопределенность измерения – это неотрицательный параметр, связанный с результатом измерения, который характеризует рассеяние значений, логически относимых к измеряемой величине. Сокращенный термин **«неопределенность»** в данном документе означает **«неопределенность измерения»** в тех случаях, когда это не приводит к недоразумениям. Типичные источники погрешностей измерения перечислены в Приложении С.

2.3. Измеряемая величина – это конкретная величина, подлежащая измерению. При калибровке обычно имеют дело только с одной измеряемой величиной или выходной величиной Y , которое зависит от количества **входных величин** X_i ($i = 1, 2, \dots, N$) в соответствии с функциональным отношением

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X) \quad (2.1)$$

Функция модели f представляет собой процедуру измерения и метод оценки. Она описывает, каким образом значения выходной величины Y получаются из значений входных величин X_i . В большинстве случаев они будут представлять собой аналитическое выражение, но также и группу таких выражений, которые включают в себя исправления и коэффициент коррекции для получения систематических значений, таким образом, приводя к более сложному отношению, которое не описано прямо в качестве одной функции. Далее, f можно подсчитать экспериментально. f может также существовать в форме компьютерного алгоритма, который необходимо подсчитывать численно. Также f может представлять собой сочетание обеих форм.

2.4. В зависимости от способа определения значения величины и его неопределенности совокупность входных величин X_i можно разбить на две категории:

(а) величины, чья расчетная и связанная неопределенности прямо определены в ходе текущего измерения. Данные значения можно получить, например, из единичного наблюдения, многократных наблюдений или выводов на основании опыта. Сюда может входить определение коррекции показаний приборов, а также коррекция влияющих величин, таких как комнатная температура, барометрическое давление или влажность;

(б) величины, чья расчетная и связанная неопределенности попадают в измерение из внешних источников, таких как откалиброванные стандарты, сертифицированные справочные материалы или справочные данные, полученные из записей.

2.5. Оценка измеряемой величины Y , **выходная оценка** y , получается из уравнения (2.1) при использовании **входных оценок** x_i для значений входных величин X_i .

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (2.2)$$

Очевидно, что входные оценки являются самым надежным показателем, который был исправлен по всем параметрам, имеющим значение для модели. Если нет, то необходимые исправления представляются как отдельные входные величины.

2.6. **Дисперсия** распределения случайной переменной, или положительный квадратный корень дисперсии, называется **стандартным отклонением** и используется как измерение распределения значений. **Стандартная неопределенность измерения** выходной оценки или результата измерения y , обозначаемая как $u(y)$, - это стандартное отклонение измеряемой величины Y . Она должна определяться из оценок x_i входных величин X_i и их стандартных неопределенностей $u(x_i)$. Стандартная неопределенность значения имеет то же измерение, что и оценка. В некоторых случаях **относительная стандартная неопределенность измерения** может быть соответствующей. Она может представлять собой относительную стандартную неопределенность оценки, разделенную на модуль (абсолютное значение), и потому является безразмерной. Если значение равно нулю, данный расчет использовать нельзя.

3. ОЦЕНКА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ВХОДНЫХ ВЕЛИЧИН

3.1. Общая информация

3.1.1. Неопределенность измерения входных величин оценивается методом оценки по типу А или по типу В. **Оценка стандартной неопределенности по типу А** – это метод оценки стандартной неопределенности с помощью статистического анализа совокупности наблюдений. В данном случае стандартная неопределенность – это экспериментальное стандартное отклонение среднего значения, которое следует из процедуры осреднения или анализа соответствующей регрессии. **Оценка стандартной неопределенности по типу В** – это метод оценки неопределенности методом, отличным от статистического анализа совокупности наблюдений. В данном случае оценка стандартной неопределенности основана на иных научных данных.

Примечание: В калибровке иногда имеют место случаи, когда все возможные значения величины находятся на одной стороне одного пограничного значения. Хорошо известна так называемая косинусная ошибка. Подобные особые случаи рассмотрены в [1].

3.2. Оценка стандартной неопределенности по типу А

3.2.1. Оценка стандартной неопределенности по типу А может применяться в случаях, когда при одинаковых условиях измерения для одной из входных величин было сделано несколько независимых наблюдений. Если в процессе измерения имеются достаточные условия, будет иметь место ощутимое рассеивание или распространение полученных значений.

3.2.2. Предположим, что повторно измеренная входная величина X_i - это величина Q . При статистически независимых наблюдениях n ($n > 1$), значение величины Q представляет собой \bar{q} , **арифметическое или среднее значение** конкретных полученных значений q_j ($j = 1, 2, \dots, n$)

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n q_j \quad (3.1)$$

Неопределенность измерения величины \bar{q} рассчитывается одним из следующих методов:

(а) Значение дисперсии распределения вероятности представляет собой **экспериментальную дисперсию** $s^2(q)$ величин q_i , которая выражается так:

$$s^2(q) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2 \quad (3.2)$$

Данный (положительный) квадратный корень называется **экспериментальным стандартным отклонением**. Наилучшее значение дисперсии арифметического значения \bar{q} представляет собой **экспериментальную дисперсию среднего значения**, которое дано:

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2 q}{n} \quad (3.3)$$

Данный (положительный) квадратный корень называется **экспериментальным стандартным отклонением среднего значения**. Стандартная неопределенность $u(\bar{q})$ входного значения \bar{q} , представляет собой **экспериментальное стандартное отклонение среднего значения**

$$u(\bar{q}) = s(\bar{q}) \quad (3.4)$$

Предупреждение: Обычно, когда число n повторных измерений является низким ($n < 10$), следует рассмотреть вопрос надежности оценки стандартной неопределенности по типу А, как показано в уравнении (3.4). Если количество наблюдений увеличить невозможно, следует рассмотреть другие приведенные в тексте способы оценки стандартной неопределенности.

(b) по хорошо изученным и контролируемым статистически измерениям может использоваться **объединенная оценка дисперсии** s_p^2 , которая характеризует дисперсию лучше, чем стандартное отклонение, рассчитанное из ограниченного количества наблюдений. Если в таком случае значение входной величины Q определяется как арифметическое значение \bar{q} низкого количества n независимых наблюдений, дисперсия среднего значения может быть определена следующим образом:

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s_p^2}{n} \quad (3.5)$$

Стандартная неопределенность рассчитывается из данного значения с помощью уравнения (3.4).

3.3. Оценка стандартной неопределенности по типу В

3.3.1. Оценка стандартной неопределенности по типу В – это метод неопределенности оценки x_i входной величины X_i методом, отличным от статистического анализа совокупности наблюдений. Стандартная неопределенность $u(x_i)$ оценивается через теоретические выводы на основании всей имеющейся информации по возможной вариативности X_i . Значения данной категории можно получить из следующих источников:

- предыдущих данных по измерению;
- опыта использования или общих понятий по функционированию и свойствам необходимых материалов и оборудования;
- технических паспортов;
- данных из сертификатов по калибровке и других сертификатов;

- неопределенности справочных данных из записей.

3.3.2. Должное использование имеющейся информации по оценке стандартной неопределенности по типу В говорит о необходимости понимания, вытекающего из опыта и общих знаний. Это умение, которому можно научиться на практике. Должным образом организованная оценка неопределенности может быть такой же надежной, как и оценка стандартной неопределенности по типу В, особенно в том случае измерения, когда оценка по типу А основана только на относительно не большом количестве независимых наблюдений. Необходимо различать следующие случаи:

(а) Когда по величине X_i известно только **единственное значение**, например, например, единственное измеренное значение, результирующее значение предыдущего измерения, справочное значение из литературы или корректирующее значение, то в качестве x_i будет использоваться данное значение. В случаях, где дана связанная с x_i стандартная неопределенность $u(x_i)$, то должна использоваться она. В других случаях она должна быть рассчитана на основании надежных данных по неопределенности. Если количество наблюдений увеличить нельзя, к оценке стандартной неопределенности следует использовать другой подход. Он описан в пункте (b).

(b) Когда по величине X_i на основании теоретических или опытных данных можно использовать **распределение вероятностей**, то в качестве значения x_i и его стандартной неопределенности $u(x_i)$ соответственно необходимо принять соответствующее математическое ожидание или расчетное значение и квадратный корень дисперсии данного распределения.

(с) Только в том случае, если по величине X_i можно рассчитать **верхнюю и нижнюю границы** a_+ и a_- (например, технические паспорта измерительного оборудования, диапазон температур, погрешность округления или формулы в связи с автоматической обработкой информации), по возможной вариативности входной величины X_i следует предположить наличие распределения вероятностей с постоянной плотностью вероятностей между данными границами (прямоугольное распределение вероятности). В соответствии с вышеописанным случаем (b) это приводит к

$$x_i = \frac{1}{2} (a_+ + a_-) \quad (3.6)$$

для оценки входной величины

$$u^2(x_i) = \frac{1}{12} (a_+ - a_-)^2 \quad (3.7)$$

для квадрата стандартной неопределенности. Если разница между предельными значениями определяется через $2a$, уравнение (3.7) превращается в

$$u^2(x_i) = \frac{1}{3} a^2 \quad (3.8)$$

В отсутствие любой иной информации помимо границ вариативности прямоугольное распределение представляет собой адекватное описание в терминах вероятностей при условии недостаточности знаний по входной величине X_i . Но если известно, что срединные значения рассматриваемой величины интервала вариативности представляются более вероятными, чем значения, более близкие к границам, то треугольное или нормальное распределение может быть лучшей моделью. С другой стороны, если близкие к границам значения представляются более вероятными, чем срединные значения, более подходящим может быть распределение в форме U. По оценке неопределенности в данных случаях см. источник 1.

4. РАСЧЕТ СТАНДАРТНОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ВЫХОДНОЙ ВЕЛИЧИНЫ

4.1. По независимым входным величинам квадрат стандартной неопределенности выходной величины y выражен следующим образом:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N u_i^2(y) \quad (4.1)$$

Примечание: при калибровке иногда имеют место случаи, когда функция модели является строго не линейной или некоторые из коэффициентов чувствительности (см.

уравнение (4.2) и (4.3) исчезают и в уравнение (4.1) должны быть включены члены более высокого порядка. По методу работы в подобных особых случаях см. источник 1.

Величина $u_i(y)$ ($i=1, 2 \dots N$) – это вклад в стандартную неопределенность выходной величины y , что вытекает из стандартной неопределенности входной величины x_i .

$$u_i(y) = c_i u(x_i) \quad (4.2)$$

где c_i является **коэффициентом чувствительности**, относящимся к входной величине x_i , который для входной величины x_i рассчитывается как частная производная функции модели f по X_i :

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} = \frac{\partial f}{\partial X_i} \bigg|_{X_1=x_1 \dots X_N=x_N} \quad (4.3)$$

4.2. Коэффициент чувствительности c_i описывает степень, на которую на выходное значение y оказывают влияние вариации входного значения x_i . Данный коэффициент можно рассчитать из функции модели f с помощью уравнения (4.3) или с помощью численных методов, то есть через расчет изменения выходного значения y из-за соответствующего изменения входной величины x_i $+u(x_i)$ и $-u(x_i)$ и через принятие за значение c_i конечной разницы в y , разделенной на $2u(x_i)$. Иногда более разумным представляется подсчет изменений в выходной величине y через попытку повтора измерения, например, $x_i \pm u(x_i)$.

4.3. В то время как $u(x_i)$ всегда имеет положительное значение, $u_i(y)$ в соответствии с уравнением (4.2) принимает либо положительное либо отрицательное значение, в зависимости от знака коэффициента чувствительности c_i . Знак $u_i(y)$ следует учитывать в случае корреляции входных величин, см. уравнение (D4) Приложения D.

4.4. Если функция модели f является суммой или разницей входных значений X_i ,

$$f(X_1, X_2 \dots, X_N) = \sum_{i=1}^N p_i X_i, \quad (4.4)$$

выходная величина в соответствии с уравнением (2.2) приводится через соответствующую сумму или разницу входных величин

$$y = \sum_{i=1}^N p_i X_i \quad (4.5)$$

в то время как коэффициенты чувствительности равняются p_i и уравнение (4.1) выглядит тогда следующим образом:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N p_i^2 u^2(x_i) \quad (4.6)$$

4.5. Если функция модели f – произведение или частное входных величин X_i

$$f(X_1, X_2 \dots, X_N) = c \prod_{i=1}^N X_i^{p_i}, \quad (4.7)$$

выходное значение снова соответствует результату или коэффициенту входных величин

$$y = c \prod_{i=1}^N X_i^{p_i} \quad (4.8)$$

В этом случае коэффициенты чувствительности равняются $p_i y/x_i$ и выражение, аналогичное уравнению (4.6), получается из уравнения (4.1), если используются относительные стандартные неопределенности $w(y) = u(y)/y$ и $w(x_i) = u(x_i)/x_i$.

$$w^2(y) = \sum_{i=1}^N p_i^2 w^2(x_i) \quad (4.9)$$

4.6. Если две входные величины X_i и X_k до определенной степени **коррелируют** друг с другом, то есть если они каким-либо образом взаимозависимы, их **ковариация** также должна считаться вкладом в неопределенность. По алгоритму действий см. Приложение D. Способность учитывать влияние корреляции зависит от знания процесса измерения и от оценки взаимозависимости входных величин. В целом, следует иметь в виду, что если оставлять корреляции между входными величинами без внимания, то это может привести к неверной оценке стандартной неопределенности измеряемой величины.

4.7. Ковариация значений двух входных величин X_i и X_k может считаться равной нулю или считаться незначительной, если:

- (а) входные величины X_i и X_k независимы, например, потому, что за ними осуществлялось периодическое, но не одновременное наблюдение в ходе различных независимых экспериментов, или потому, что они представляют собой результирующие величины различных оценок, которые были получены независимым образом;
- (б) любая из входных величин X_i и X_k может считаться постоянной;
- (с) исследования не дают данных по корреляции между входными величинами X_i и X_k .

Иногда корреляции можно устранять через правильный выбор функции модели.

4.8. В анализе неопределенности по измерениям – иногда его называют бюджетом неопределенности измерения – должны перечисляться все источники неопределенности вместе с соответствующими неопределенностями измерения и методами их оценки. По повторным измерениям также следует указывать количество n наблюдений. Во избежание недоразумений рекомендуется представлять необходимую информацию по анализу в форме таблицы. В данной таблице все величины должны идти под физическим символом X_i или небольшим идентифицирующим знаком. По каждому из них следует указать, по крайней мере, величину x_i , соответствующую стандартную неопределенность измерения $u(x_i)$, коэффициент чувствительности c_i и различные вклады неопределенности $u_i(y)$. В таблице также следует указать единицу измерения с численным значением по каждой величине.

4.9. Пример подобной структуры приведен в Таблице 4.1, которая используется в случае отсутствия корреляции между входными величинами. Стандартная неопределенность результата измерения $u(y)$, приведенного в правом нижнем углу таблицы, равняется квадратному корню из суммы квадратов всех вкладов неопределенности в крайней правой колонке. Серая часть таблицы не заполнена.

Таблица 4.1. Схема структуры величин, оценок, стандартных неопределенностей, коэффициентов чувствительности и вклады в неопределенность, которые используются в анализе неопределенности измерения

Величина X_i	Значение x_i	Стандартная неопределенность $u(x_i)$	Распределение вероятности	Коэффициент чувствительности c_i	Вклад в стандартную неопределенность $u_i(y)$
X_1	x_1	$u(x_1)$		c_1	$u_1(y)$
X_2	x_2	$u(x_2)$		c_2	$u_2(y)$
:	:	:		:	:
X_N	x_N	$u(x_N)$		c_N	$u_N(y)$
Y	y				$u_i(y)$

5. РАСШИРЕННАЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ

5.1. В ЕА принято, что калибровочные лаборатории, аккредитованные членом ЕА, в свидетельствах калибровки указывают *расширенную неопределенность* U , которая получается умножением стандартной неопределенности измерения $u(y)$, связанной с оценкой y выходной величины, на *коэффициент охвата* k :

$$U = ku(y) \tag{5.1}$$

В случаях, при которых измеряемой величине может приписываться нормальное распределение вероятностей (распределение Гаусса) и при которых стандартная неопределенность измерения, связанная с оценкой выходной величины достаточно надежна, коэффициент охвата стандартно принимается равным 2 ($k=2$). Приписанная расширенная неопределенность измерения соответствует *вероятности покрытия* примерно 95 %. Эти условия, в общем, справедливы для калибровок.

5.2. Принятие нормального распределения может не в каждом случае рассматриваться как подходящее. Однако в случаях, когда несколько вкладов неопределенности ($N \geq 3$), которые получены из распределений вероятностей независимых величин, например, нормальные или прямоугольные распределения, дают сопоставимые вклады в

стандартную неопределенность измерения, связанную с оценкой выходной величины, выполняются условия центральной предельной теоремы, так что в очень хорошем приближении может приниматься, что для выходной величины справедливо нормально распределение.

5.3. Надежность стандартной неопределенности выходного значения определяется эффективностью степеней свободы (см. Приложение Е). Однако критерий надежности соблюдается всегда, если ни один из компонентов вклада неопределенности не получен методом оценки по типу А на основании менее десяти многократных наблюдений.

5.4. Если ни одно из данных условий (надежность нормального или достаточного распределения), стандартный коэффициент охвата $k = 2$ может привести к расширенной неопределенности, которая соответствует вероятности охвата на уровне менее 95%. В данных случаях для обеспечения соответствия значения расширенной неопределенности, необходимо следовать другим процедурам. Использование примерно такой же вероятности охвата является совершенно необходимым при любом сравнении двух результатов измерения одной и той же величины, например, при оценке межлабораторного сравнения или оценки соответствия спецификации.

5.5. Даже в случае нормального распределения может иметь место случай, когда стандартная неопределенность выходной величины недостаточно надежна. Если в данном случае нецелесообразно увеличить количество n повторных измерений или использовать вместо оценки по типу В из-за низкого уровня надежности оценку по типу А, следует прибегнуть к методу из Приложения Е.

5.6. В остальных случаях, то есть во всех случаях, в которых принятие нормального распределения надежно не обосновано, необходимо добывать информацию о действительном распределении вероятностей значений выходной величины, и из него определять значение коэффициента охвата, который соответствует вероятности покрытия 95 %.

6. ПОШАГОВАЯ ПРОЦЕДУРА РАСЧЕТА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ

6.1. Далее приводятся рекомендации по использованию данного документа на практике (см. разработанные примеры в дополнении):

(а) математическими терминами выразить зависимость измеряемой величины (выходной величины) Y от входных величин X_i в соответствии с уравнением (2.1). При прямом сравнении двух стандартов уравнение может быть очень простым, например,

$$Y = X_1 + X_2;$$

(b) определить и применять все нужные исправления;

(c) перечислить все источники неопределенности в форме анализа неопределенности, описанного в Разделе 4;

(d) рассчитать стандартную неопределенность $u(\bar{q})$ по повторно измеренным величинам в соответствии с подразделом 3.2;

(e) по единичным значениям, например, результирующим значениям предыдущих измерений, корректирующим значениям или значениям, взятым из литературы, использовать стандартную неопределенность, где она дана или может быть рассчитана в соответствии с пунктом 3.2.2 (а). Учесть, каким образом представлена неопределенность. Если данных, на основании которых можно рассчитать стандартную неопределенность, нет, на основании научных исследований использовать значение $u(x_i)$;

(f) по входным величинам, распределение вероятности которых известно или возможно рассчитать, рассчитать математическое ожидание и стандартную неопределенность $u(x_i)$ в соответствии с пунктом 3.3.2 (b). Если даны или можно рассчитать только верхние и нижние границы, рассчитать стандартную неопределенность $u(x_i)$ в соответствии с пунктом 3.3.2 (c);

(g) рассчитать вклад $u_i(y)$ в неопределенность выходной величины из входной величины x_i по каждому входной величине X_i в соответствии с уравнениями (4.2) и (4.3) и для

получения квадрата из стандартной неопределенности $u(y)$ измеряемой величины сложить значения их квадратов в соответствии с уравнением (4.1). Если известно, что между входными величинами имеет место корреляция, применять процедуру из Приложения D;

(h) рассчитать расширенную неопределенность U через произведение стандартной неопределенности $u(y)$ выходного значения и коэффициента охвата k , отобранного в соответствии с Разделом 5;

(i) отразить результат измерения, составляющего величину y измеряемой величины, соответствующую расширенную неопределенность U и коэффициент охвата k в свидетельстве калибровки в соответствии с Разделом 6 документа ILAC P14 [5] и документа ILAC P15 8[5].

7. ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

[1] JCGM 100:2008 GUM 1995 with minor corrections, Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement. (Available from www.bipm.org)

[2] ISO/IEC 17025/2005, General requirements for the competence of testing and calibration laboratories.

[3] JCGM 200:2008 International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (Available from www.BIPM.org)

[2] ISO/IEC 17025/2005, General requirements for the competence of testing and calibration laboratories.

[3] JCGM 200:2008 International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (Available from www.BIPM.org)

[4] International Standard ISO 3534-1, Statistics-Vocabulary and symbols-Part 1: General statistical terms and terms used in probability – (ISO 3534-1:2006)

[5] ILAC P14:12/2010 – ILAC Policy for Uncertainty in Calibration

[6] JCGM 104:2009 Evaluation of measurement data – An introduction to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” and related documents. (available from www.bipm.org).

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Калибровочные и измерительные возможности (СМС)

Концепция калибровочных и измерительных возможностей (СМС) тщательно изучается в работе по калибровочным и измерительным возможностям, изданной Объединенной рабочей группой ВРМ/ILAC 7 сентября 2007 года. Данная работа включена в политику ILAC по неопределенности в калибровке в качестве приложения. Данная политика является в мире основой системного подхода к СМС аккредитованными лабораториями [5].

При определении СМС аккредитованными лабораториями следует использовать описанные в данном документе методы оценки неопределенности.

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Глоссарий некоторых существенных терминов

V1. Среднее арифметическое значение (Раздел С.2.19)

Среднее значение; сумма значений, разделенная на количество значений.

V2. Калибровочные и измерительные возможности (СМС)

Калибровочные и измерительные возможности (СМС) выражаются следующими терминами:

1. измеряемая величина или справочный материал;
2. метод/процедура калибровки/измерения и/или тип оборудования/материала, подлежащего калибровке/измерению;
3. диапазон измерения и дополнительные параметры там, где это возможно применить, например, частота напряжения;
4. неопределенность измерения.

Для полного разъяснения см [5].

V3. Коэффициент корреляции (из [1]; Раздел С.3.6)

Коэффициент корреляции – это измерение относительной взаимозависимости двух переменных. Он равен отношению их ковариации к положительному квадратному корню результата их дисперсии. Для получения более подробного описания см. [1].

V4. Ковариация (из [1]; Раздел С.3.4)

Мера взаимной зависимости двух случайных переменных, которая равна математическому ожиданию произведения отклонений обоих случайных переменных от своих математических ожиданий. Полное определение можно найти в [1].

V5. Коэффициент охвата ([3]; термин 2.3.8)

Число более одного, на которое умножается объединенная стандартная неопределенность измерения для получения расширенной неопределенности измерения.

V6. Вероятность охвата ([3]; термин 2.3.7)

Вероятность того, что совокупность верных значений величин измеряемой величины находится в определенном интервале охвата. Примечание: термин «верное значение» (см. Приложение D) не используется в данном Руководстве по причинам, перечисленным в D.3.5; термины «Значение измеряемой величины», «Верное значение измеряемой величины» считаются равнозначными. (GUM 3.1.1). См также [6]. См. также пункт 6 (JCGM 104:2009) главы **V7. «Экспериментальное стандартное отклонение»** (раздел 4.2.2).

Положительный квадратный корень экспериментальной дисперсии.

V8. Расширенная неопределенность (измерения) ([3]; термин 2.3.5)

Результат объединенной стандартной неопределенности измерения и фактор, больший чем **V9. Экспериментальная дисперсия** (из [1]; Раздел 4.2.2).

Величина, которая характеризует дисперсию результатов серии наблюдений n той же измеряемой величины, что дана уравнением (3.2) в данной работе.

V10. Входная оценка (из [1]; Раздел 4.1.4 и С2.26)

Значение входной величины, которое используется в оценке результата измерения.

V11. Входная величина (из [1]; Раздел 4.1.2)

Величина, от которой зависит измеряемая величина и которая учитывается в процессе оценки результата измерения.

V12. Измеряемая величина ([3]; Термин 2.3)

Величина, подлежащая измерению.

V13. Неопределенность измерения, неопределенность ([3]; Раздел 2.26)

Неотрицательный параметр, который характеризует дисперсию значений величины, приписываемые измеряемой величине на основании использованных данных.

V14. Выходная оценка (из [1]; Раздел 4.1. и С2.26)

Результат измерения, рассчитанный из входных значений функции модели.

V15. Выходная величина (из [1]; Раздел 4.1.2)

Величина, которая представляет собой измеряемую величину в оценке результатов измерения.

V16. Объединенная оценка дисперсии (из [1]; Раздел 4.2.4)

Оценка экспериментальной дисперсии, полученная из ряда длительных наблюдений одной и той же измеряемой величины в хорошо изученных измерениях в рамках статистического контроля.

V17. Распределение вероятностей ([1]; Раздел C.2.3)

Функция, дающая вероятность того, что случайная переменная принимает любое данное значение или принадлежит к данному ряду значений.

V18. Случайная переменная ([1]; Раздел C.2.2)

Переменная, которая может принимать любое значение определенного ряда значений и с которой связано распределение вероятностей.

V19. Относительная стандартная неопределенность измерения ([3]; Раздел 2.3.2)

Стандартная неопределенность измерения, разделенная на абсолютное значение измеренного значения величины.

V20. Коэффициент чувствительности входной оценки (из [1]; Раздел 5.1.3)

Дифференциальное изменение в выходной оценке, обусловленное дифференциальным изменением во входной оценке и разделенное на изменение в данной входной оценке.

V21. Стандартное отклонение ([1]; Раздел C.2.12))

Положительный квадратный корень из дисперсии.

V22. Стандартная неопределенность измерения ([3]; термин 2.3.0)

Неопределенность измерения, выраженная в качестве стандартного отклонения.

V23. Оценка неопределенности измерения по типу А ([3]; Раздел 2.28)

Оценка компонента неопределенности измерения через статистический анализ измеренных значений величин, полученных в определенных условиях измерения.

V24. Оценка неопределенности измерения по типу В ([3]; Термин 229)

Оценка компонента неопределенности измерения способом, отличным от оценки неопределенности измерения по типу А.

V25. Бюджет неопределенности ([3]; Раздел 2.33)

Данные по неопределенности измерения и элементу данной неопределенности измерения и их расчета и сочетания.

V26. Дисперсия (из [1]; Раздел C.2.11)

Математическое ожидание квадрата центрированной случайной переменной.

ПРИЛОЖЕНИЕ С

Источники неопределенности измерения

С1. Неопределенность результата измерения говорит о недостаточности знаний по значениям измеряемой величины. Полное знание требует бесконечного количества информации. Явления, которые способствуют неопределенности и, как следствие, тому факту, что результат измерения не может обозначаться уникальным значением, называются источниками неопределенности. На практике имеется множество возможных источников неопределенности [1], в том числе:

- (a) неполное определение измеряемой величины;
- (b) неполная реализация определения измеряемой величины;
- (c) нерепрезентативная выборка – измеренный образец может не представлять определяемую измеряемую величину;
- (d) неверно оцененное воздействие условий окружающей среды или несовершенное их измерение;
- (e) субъективная систематическая погрешность оператора при снятии показаний с аналоговых приборов;
- (f) конечная разрешающая способность прибора или порог чувствительности;
- (g) неточные знания, приписанные эталонам, используемым для измерения, и стандартным образцам веществ и материалов;
- (h) неточные значения констант и других параметров, полученных из внешних источников и используемых в алгоритме сжатия данных;
- (i) аппроксимации и предположения, используемые в методе измерения и измерительной процедуре;
- (j) разброс значений повторных наблюдений измеряемой величины при явно одинаковых условиях.

С2. Данные источники не обязательно независимы. Некоторые источники от (a) до (i) вносят вклад в (j).

Приложение D

Коррелированные входные величины

D1 Если о двух входных величинах X_i и X_k известно, что они в определенной степени коррелированы – то есть если они являются тем или иным способом зависимыми друг от друга -, то необходимо учитывать **ковариацию**, связанную с обеими оценками x_i и x_k :

$$u(x_i, x_k) = u(x_i) \cdot u(x_k) \cdot r(x_i, x_k) \quad (i \neq k) \quad (D.1)$$

как дополнительный вклад в неопределенность измерения. Степень корреляции определяется через **коэффициенты корреляции** $r(x_i, x_k)$ ($i \neq k$ или $|r| \leq 1$).

D2 В случае n пар независимых повторных наблюдений двух величин P и Q ковариация, связанная со средними арифметическими значениями \bar{p} и \bar{q} , оценивается по формуле:

$$s(\bar{p}, \bar{q}) = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{j=1}^n (p_j - \bar{p})(q_j - \bar{q}) \quad (D.2)$$

Отсюда получается коэффициент корреляции через подстановку в выражение (D.1).

D3 Корреляции входных величин могут основываться на соответствующем метрологическом опыте и общих знаниях о методе измерения. Если для корреляции между входными величинами известна или может быть оценена соответствующая ковариация, то выражение (4.1) следует заменить на:

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N c_i^2 \cdot u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{k=i+1}^N c_i \cdot c_k \cdot u(x_i, x_k) \quad (D.3)$$

где c_i и c_k являются коэффициентами чувствительности, определенными в выражении (4.3), или на

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^N u_i^2(y) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{k=i+1}^N u_i(y) \cdot u_k(y) \cdot r(x_i, x_k) \quad (D.4)$$

где вклады $u_i(y)$ в стандартную неопределенность, которая связана с оценкой y выходной величины, получают в соответствии с выражением (4.2) из стандартной неопределенности, которая дается вместе с оценкой x_i входной величины. Важно обратить внимание на то, что второе суммирование из двух определений в выражении (D.3) или (D.4) может приобретать отрицательный знак.

D4 На практике входные величины часто коррелируют, так как для оценивания их значений используются одинаковые, характеризуемые значительными неопределенностями, физические исходные эталоны, измерительные приборы, исходные величины или методы измерения. Без потери общности предположим, что обе входные величины X_1 и X_2 с их оценками x_1 и x_2 зависят от независимых друг от друга переменных $Q_l (l = 1, 2, \dots, L)$:

$$X_1 = g_1(Q_1, Q_2, \dots, Q_L) \quad (D.5)$$

$$X_2 = g_2(Q_1, Q_2, \dots, Q_L)$$

где безусловно не все переменные $Q_l (l = 1, 2, \dots, L)$ одновременно могут встречаться в обеих функциях. Оценки x_1 и x_2 входных величин являются коррелированными в некоторой степени, даже если оценки $q_l (l = 1, 2, \dots, L)$ являются некоррелированными. Ковариация $u(x_1, x_2)$, связанная с оценками x_1 и x_2 , выражается через:

$$u(x_1, x_2) = \sum_{l=1}^L c_{1l} \cdot c_{2l} \cdot u^2(q_l) \quad (D.6)$$

Здесь c_{11} и c_{21} являются коэффициентами чувствительности, выведенными из функций g_1 и g_2 по аналогии с выражением (4.3). Так как в сумму вносят вклад только те члены, чьи коэффициенты чувствительности не равны нулю, то ковариация будет равна нулю, когда функции g_1 и g_2 не имеют общих переменных. Коэффициент корреляции $r(x_1, x_2)$ для оценок x_1 и x_2 оценивается из выражения (D.6) вместе с выражением (D.1).

D5. В следующем примере в общем определяются корреляции между значениями, которые могут возникнуть при калибровке двух рабочих эталонов с помощью одного и того же исходного эталона.

Измерительная проблема

Оба эталона, которые представляют величины X_1 и X_2 , связываются с помощью измерительной системы с исходным эталоном, который реализует (воспроизводит) величину Q_S . С помощью измерительной системы оценивается соответствующая разница z между значениями, воспроизводимыми рабочим эталоном и исходным эталоном вместе со стандартной неопределенностью $u(z)$. Само значение q_S известно со стандартной неопределенностью измерения $u(q_S)$.

Математическая модель

Оценки x_1 и x_2 являются зависимыми от значения q_S исходного эталона и наблюдаемых разниц z_1 и z_2 в соответствии с соотношениями

$$x_1 = q_S - z_1$$

$$x_2 = q_S - z_2 \tag{D.7}$$

Стандартные неопределенности и ковариации

Оценки z_1 , z_2 и q_S принимаются некоррелированными, когда они были оценены в различных измерениях. Стандартные неопределенности рассчитываются из выражения (4.4), и ковариация, связанная с оценками x_1 и x_2 , получается из выражения (Г.6) при допущении, что $u(z_1) = u(z_2) = u(z)$, будет:

$$u^2(x_1) = u^2(q_S) + u^2(z)$$

$$u^2(x_2) = u^2(q_S) + u^2(z) \tag{D.8}$$

$$u(x_1, x_2) = u^2(q_S)$$

Коэффициент корреляции, выведенный из этих результатов будет равен:

$$r(x_1, x_2) = \frac{u^2(q_S)}{u^2(q_S) + u^2(z)} \tag{D.9}$$

В зависимости от соотношения между стандартными неопределенностями $u(q_S)$ и $u(z)$ его значение (коэффициента корреляции) лежит в диапазоне от 0 до +1.

D6. Случай, описанный с помощью уравнения (D.5) является одним из случаев, в котором можно избежать прямого учета корреляции при оценивании стандартной неопределенности измерения измеряемой величины через надлежащий выбор функции модели. Если используется новая функция модели, которая напрямую содержит независимые переменные Q_I , тем что заменяются первоначальные переменные X_1 и X_2 в первоначальной функции модели f в соответствии с выражением (D.5), то коррелированные переменные X_1 и X_2 в новой функции модели и, следовательно, корреляция между ними больше не возникают.

D7. Существуют однако случаи, в которых корреляции между двумя входными величинами X_1 и X_2 нельзя избежать, когда, например, один и тот же измерительный прибор или один и тот же исходный эталон используется при оценивании входных оценок x_1 и x_2 , то выражения для преобразования в новые независимые переменные не существует. Если, к тому же, степень корреляции неизвестна, то может быть полезным оценить максимальное влияние, которое имеет эта корреляция, с помощью верхней

границы стандартной неопределенности измерения, связанной с измеряемой величиной. Она (граница) имеет – если другие корреляции не должны учитываться - форму:

$$u^2(y) \leq (|u_1(y)| + |u_2(y)|)^2 + u_r^2(y) \quad (D.10)$$

где $u_r(y)$ - это вклад в стандартную неопределенность измерения всех оставшихся входных величин, которые принимаются как некоррелированные к обеим входным величинам X_1 и X_2 .

Примечание: Выражение (D.10) может относительно просто распространяться на случаи, которые обрабатывают одну или несколько групп с двумя или более коррелированными входными величинами. В таком случае следует ввести для каждой группы коррелированных величин квадрат соответствующей суммы для наихудшего случая в выражении (D.10).

Приложение Е

Коэффициенты охвата из эффективных степеней свободы

Е1. Установление коэффициента охвата k , который соответствует определенной вероятности охвата, требует, чтобы принималась во внимание надежность стандартной неопределенности измерения $u(y)$, которая связана с оценкой y выходной величины. Это означает, что рассматривается, как хорошо стандартное отклонение, связанное с результатом измерения, оценивается через $u(y)$. При оценке стандартного отклонения нормального распределения мерой надежности являются степени свободы оценок, которые зависят от объема соответствующей выборки. Подходящая мера для надежности стандартной неопределенности измерения, связанной с оценкой выходной величины, аналогично представляет собой эффективную степень свободы v_{eff} . Хотя предположения центральной предельной теоремы теории вероятности выполняются, эффективная степень свободы, относящаяся к результату измерения, дается в хорошем приближении через комбинацию эффективных степеней свободы различных вкладов неопределенности $u_i(y)$.

Е2. Если условия для применения центральной предельной теоремы налицо, то метод для расчета коэффициента охвата k включает три следующих шага:

(а) Оценка стандартной неопределенности, связанной с оценкой выходной величины, в соответствии с методом пошаговой оценки, данным в разделе 7.

(б) Оценка эффективных степеней свободы v_{eff} для стандартной неопределенности измерения $u(y)$, с помощью формулы Велча-Саттерсвейта:

$$v_{eff} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{v_i}} \quad (E.1)$$

где $u_i(y)$ ($i=1,2,\dots,N$) – определенные по формуле (4.2) вклады в стандартную неопределенность измерения, которая соответствует оценке y выходной величины, и v_i – эффективная степень свободы вклада неопределенности $u_i(y)$.

Для значения стандартной неопределенности измерения $u(q)$, которое определяется по методу оценки неопределенности по типу А в соответствии с подразделом 3.1, степень свободы определяется через $v_i = n-1$. Установление степени свободы, которая соответствует значению стандартной неопределенности измерения, определенным с помощью оценки неопределенности по типу В, требует, наоборот, в каждом случае подробного рассмотрения. При этом необходимо принимать во внимание, что определение областей изменчивости обычно проводят так, чтобы избежать недооценки. Если например устанавливаются верхняя и нижняя границы a и a_+ , то они обычно выбираются так, что вероятность того, что соответствующая величина лежит за пределами этих границ, очень мала. В условиях этого предположения степени свободы для стандартной неопределенности измерения $u(x_i)$, значение которой определено с помощью оценки неопределенности по типу В, могут приниматься $v_i \rightarrow \infty$.

(с) Определение коэффициента покрытия k из таблицы Д.1. Эта таблица базируется на t -распределении, которое установлено для вероятности покрытия 95,45 %. Если v_{eff} является не целым числом, что обычно и происходит, то v_{eff} уменьшают до ближайшего целого числа.

Таблица Е1 – Коэффициенты охвата k для различных степеней свободы v_{eff}

$v_{эфф}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
k	13,97	4,53	3,31	2,87	2,65	2,52	2,43	2,37	2,32	2,28	2,25	2,23	2,21	2,20	2,18

$v_{эфф}$	16	17	18	19	20	25	30	35	40	45	50	∞
k	2,17	2,16	2,15	2,14	2,13	2,11	2,09	2,07	2,06	2,06	2,05	2,00

ДОПОЛНЕНИЕ 1 ПРИМЕРЫ

СОДЕРЖАНИЕ

- Д1. ВВЕДЕНИЕ
- Д2. КАЛИБРОВКА ГИРИ С НОМИНАЛЬНЫМ ЗНАЧЕНИЕМ 10 КГ
- Д3. КАЛИБРОВКА ЭТАЛОННОЙ МЕРЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ В 10 КОМ
- Д4. КАЛИБРОВКА КОНЦЕВОЙ МЕРЫ ДЛИНЫ (КМД) С НОМИНАЛЬНОЙ ДЛИНОЙ 50 ММ
- Д5. КАЛИБРОВКА ТЕРМОПАРЫ ТИПА N ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ 1 000° С
- Д6. КАЛИБРОВКА ДАТЧИКА МОЩНОСТИ ЧАСТОТОЙ 19 ГГц
- Д7. КАЛИБРОВКА СТУПЕНЧАТОГО КОАКСИАЛЬНОГО АТТЕНЮАТОРА ДЛЯ ОСЛАБЛЕНИЯ 30 ДБ

Д1. Введение

Д1.1. Для демонстрации метода оценки неопределенности измерения используются следующие примеры. По различным направлениям специальными рабочими группами должны быть разработаны более типичные и показательные примеры, основанные на соответствующих моделях. Однако и в представленных здесь моделях можно найти общее руководство при оценке неопределенности измерения.

Д1.2. Примеры основаны на исследованиях Экспертных групп Европейской организации по аккредитации (EAL). Для того чтобы данные исследования стали более понятными для сотрудников лабораторий всех областей калибровки, их упростили и систематизировали. Таким образом, есть вероятность, что данная совокупность примеров будет способствовать лучшему пониманию особенностей составления модели оценки и систематизации процесса оценки неопределенности измерения, независимого от области калибровки.

Д1.3. Вклады в неопределенность и значения, данные в примерах, не представляют собой обязательные или типичные требования. Лаборатории должны определять составляющие неопределенности на основании функции модели, которую они используют в оценке конкретной проводимой калибровки, и фиксировать оцененную неопределенность измерения в сертификате по калибровке, который они выдают. В описанных примерах выполнены приведенные в Разделе 5 условия по применению стандартного коэффициента охвата $k = 2$.

Д1.4. Далее представлены примеры. В соответствии с пошаговой процедурой EAL-R2, описанной в Разделе 7, общая схема содержит:

- небольшое описательное название;
- общее описание процесса измерения;
- модель оценки со списком использованных символов;
- расширенный список входных данных с небольшим описанием способа их получения;
- список наблюдений и оценка статистических параметров;
- бюджет неопределенности в форме таблицы;
- расширенную неопределенность измерения;
- запись полных результатов измерения.

Д1.5. Предполагается, что за данным первым дополнением к EAL-R2 должны следовать другие с разработанными примерами по оценке неопределенности измерения в связи с калибровкой оборудования. Примеры также можно найти в Методических документах EAL, посвященных калибровке определенных типов измерительного оборудования.

Д2. КАЛИБРОВКА ГИРИ С НОМИНАЛЬНЫМ ЗНАЧЕНИЕМ 10 КГ

Д2.1. Калибровка гири с номинальным значением массы 10 кг класса М1 (по МОЗМ) проводится методом сравнения с эталонной мерой класса F2 (по МОЗМ) с тем же номинальным значением массы, используя компаратор массы, чьи эксплуатационные характеристики предварительно определены.

Д2.2. Неизвестное действительное значение массы m_x определяется как:

$$m_x = m_s + \delta m_D + \delta m + \delta m_c + \delta B \quad (\text{Д2.1})$$

где

m_s – действительное значение массы эталонной меры

δm_D – дрейф (смещение) значения массы эталонной меры со времени последней калибровки

δm – наблюдаемая разница между массой калибруемой гири и массой эталона

δm_c – поправка на эксцентриситет и магнитный эффект

δB – поправка на выталкивание воздуха

Д2.3. Эталонная мера (m_s). Свидетельство калибровки для эталонной меры дает значение 10 000,005 г с расширенной неопределенностью 45 мг (коэффициент охвата $k = 2$).

Д2.4. Дрейф (смещение) значения стандарта (δm_D): Смещение значения эталонного стандарта из расчета предыдущих калибровок составляет ноль в пределах ± 15 мг.

Д2.5. Компаратор ($\delta m + \delta m_c$): Предварительно оцененное значение сходимости разницы между значениями масс двух гирь с одинаковыми номинальными значениями с использованием компаратора дает суммарную оценку стандартного отклонения 25 мг. Поправка относительно калибровки компаратора не берется; отклонения вследствие эксцентриситета нагрузки и магнитных эффектов оцениваются прямоугольным распределением с границами ± 10 мг.

Д2.6. Выталкивание воздуха (δB): Поправка на выталкивание воздуха не приведена; пределы результирующего отклонения оцениваются на $\pm 1 \cdot 10^{-6}$ от номинального значения.

Д2.7. Корреляция: Входные величины рассматриваются как некоррелированные.

Д2.8. Измерения: при использовании метода замещения и схемы замещения АВВА АВВА АВВА были получены три случая разницы в массе между эталонной и калибруемой гирей:

№	Действительное значение массы	Показания	Наблюдаемая разница
1	Эталонной гири	+0,010 г	
	Калибруемой гири	+0,020 г	
	Калибруемой гири	+0,025 г	
2	Эталонной гири	+ 0,015 г	+0, 01 г
	Калибруемой гири	+0,025 г	
	Калибруемой гири	+0,055 г	
3	Эталонной гири	+0,020 г	+0,03 г
	Калибруемой гири	+0,025 г	
	Калибруемой гири	+0,045 г	
	Эталонной гири	+0,040 г	
	Эталонной гири	+0,020 г	+0,02 г

Среднее арифметическое значение: $\delta m = 0,020$ г

Среднее арифметическое значение: $\overline{\delta m} = 0,020$ г

Суммарная оценка стандартного отклонения: $s_p(\delta m) = 25$ мг

(из предварительного оценивания)

Стандартная неопределенность: $u(\delta m) = s(\overline{\delta m}) = \frac{25 \text{ мг}}{\sqrt{3}} = 14,4 \text{ мг}$

Д2.9. Бюджет неопределенности (m_x)

Величина X_i	Значение x_i	Стандартная неопределенность $u(x_i)$	Распределение вероятности	Коэффициент чувствительности c_i	Вклад в стандартную неопределенность $u_i(y)$
m_s	10 000,005 г	22,5 мг	нормальное	1,0	22,5 мг
δm_D	0,000 г	8,95 мг	прямоугольное	1,0	8,95 мг
δm	0,020 г	14,4 мг	нормальное	1,0	14,4 мг
δm_c	0,000 г	5,77 мг	прямоугольное	1,0	5,77 мг
δB	0,000 г	5,77 мг	прямоугольное	1,0	5,77 мг
m_x	10 000,025 г				29, 3 мг

Д2.10. Расширенная неопределенность

$U = k \times u(m_x) = 2 \times 29,3 \text{ мг} \approx 59 \text{ мг}$

Д2.10. Полный результат измерения

Измеренное значение массы гири с номинальной массой 10 кг составляет 10,000 025 кг ± 59 мг. Указанная расширенная неопределенность измерения определяется как стандартная неопределенность измерения, умноженная на коэффициент охвата $k = 2$. Для нормального распределения она соответствует отклонениям от среднего значения с вероятностью охвата примерно 95%.

Д3. КАЛИБРОВКА ЭТАЛОННОЙ МЕРЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ В 10 КОМ

Д3.1 Сопротивление четырехклеммной эталонной меры сопротивления определяется методом замещения через сравнение с работающей в качестве эталона калиброванной четырехклеммной эталонной мерой сопротивления того же номинального значения при помощи 7½-разрядного цифрового мультиметра (DMM) в области измеряемых сопротивлений. Меры сопротивления расположены в хорошо размешанной масляной ванне с температурой 23°C, которая контролируется расположенным в центре ртутным термометром. Перед измерениями меры сопротивления необходимо выдержать в течение определенного времени для стабилизации температуры. Выводы четырех клемм каждой меры сопротивления по очереди подключаются к клеммам DMM. Осуществляется проверка, чтобы при электрическом токе DMM 100 мкА в измерительной области 10 кОм не было случая значительного самонагрева меры сопротивления. Измерительная процедура проводится также с гарантией, что наружные утечки сопротивления оказывают незначительное влияние на результат измерения.

Д3.2. Значение сопротивления R_x калибруемой меры получается из выражения:

$R_x = (R_s + \delta R_D + \delta R_{TS})r_c r - \delta R_{TX}$ Д3.1

где

R_s – значение сопротивления эталонной меры

δR_D – дрейф значения эталонной меры сопротивления с момента последней калибровки

δR_{TS} - температурная зависимость изменений сопротивления эталонной меры

$R = R_{ix}/R_{is}$ – отношение показываемых значений (индекс "i" обозначает показание) калибруемой и эталонной мер сопротивления

rC – фактор поправки на паразитические напряжения и разрешающую способность цифрового вольтметра

δR_{TX} – температурная зависимость изменений сопротивления калибруемой меры

Д3.3. Эталонная мера сопротивления (R_s): В свидетельстве калибровки на эталонную меру приведено значение сопротивления $10000,053 \text{ Ом} \pm 5 \text{ мОм}$ (коэффициент охвата ($k = 2$) при заданной температуре 23°C.

Д3.4. Дрейф значения сопротивления эталонной меры (δR_D): Дрейф значения сопротивления эталонной меры с момента последней калибровки оценен на основании практики калибровки как $+ 20$ мОм с отклонениями в интервале ± 10 мОм.

Д3.5. Температурные поправки (δR_{TS} , δR_{TX}): Температура масляной ванны контролируется калиброванным термометром и составляет 23°C . Принимаются во внимание метрологические характеристики используемого термометра и градиент температур в масляной ванне, чтобы температура мер сопротивления соответствовала заданной температуре с отклонением $\pm 0,055\text{K}$. Известное значение температурного коэффициента (ТК) $5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ эталонной меры сопротивления дает пределы $\pm 2,75$ мОм для отклонения от значения сопротивления, установленного при калибровке, которое определяется возможными отклонениями от заданной температуры ванны. На основании указаний производителя определяем, что ТК калибруемой меры сопротивления не должен превышать $10 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, чтобы отклонение сопротивления калибруемой меры из-за возможных температурных отклонений оценивалось не более чем $\pm 5,5$ мОм.

Д3.6. Измерение сопротивления (r_c): Так как наблюдения R_{iX} и R_{iS} получены с использованием одного DMM, то их вклады в неопределенность коррелированы. Этот эффект обладает тем свойством, что отношение сопротивлений приводит к снижению вкладов неопределенностей, между тем должна приниматься во внимание только относительная разность между показаниями сопротивлений из-за систематических эффектов, таких как паразитические напряжения и разрешение прибора (см. математические ссылки в разделе Д3.12). Отклонение для этого эффекта для отдельного показания оценивается $\pm 0,5 \cdot 10^{-6}$. Результирующее распределение для отношения r_c является треугольным с математическим ожиданием $1,000\ 000\ 0$ и границами $\pm 1,0 \cdot 10^{-6}$.

Д3.7. Корреляция: Входные величины рассматриваются как некоррелированные

Д3.8. Измерения (r): Было получено пять наблюдений отношения r :

№	Наблюдаемое отношение
1	1,000 010 4
2	1,000 010 7
3	1,000 010 6
4	1,000 010 3
5	1,000 010 5

Среднее арифметическое значение: $\bar{r} = 1,000\ 010\ 5$

Экспериментальное стандартное отклонение: $s(r) = 0,158 \times 10^{-6}$

Стандартная неопределенность: $u(r) = s(\bar{r}) = \frac{0,158 \cdot 10^{-6}}{\sqrt{5}} = 0,0707 \cdot 10^{-6}$

Д3.9. Бюджет неопределенности (R_x):

Величина X_i	Значение x_i	Стандартная неопределенность $u(x_i)$	Распределение вероятности	Коэффициент чувствительности c_i	Вклад в неопределенность $u_i(y)$
R_s	10 000,053	2,5 мОм	нормальное	1,0	2,5 мОм
δR_D	0,020	5,8 мОм	прямоугольное	1,0	5,8 мОм
δR_{TS}	0,000	1,6 мОм	прямоугольное	1,0	1,6 мОм
δR_{TX}	0,000	3,2 мОм	прямоугольное	1,0	3,2 мОм
r_c	1,000 000	$0,41 \times 10^{-6}$	треугольное	10 000 Ω	4,1 мОм
r	1,000 010	$0,07 \times 10^{-6}$	нормальное	10 000 Ω	0,7 мОм
R_x	10 000,178				8,33 мОм

Д3.10. Расширенная неопределенность:

$$U = k \times u(R_x) = 2 \times 8,33 \text{ мОм} \approx 17 \text{ мОм}$$

Д3.11. Полный результат измерений: сопротивление меры с номинальным значением в $10\text{ м}\Omega$ при температуры измерения в $23\text{ }^\circ\text{C}$ и силе тока при измерении в $100\text{ }\mu\text{A}$ составляет $(10\ 000,178 \pm 0,017)\ \Omega$.

Указанная расширенная неопределенность измерения получена умножением стандартной неопределенности измерений на коэффициент охвата $k = 2$. Она соответствует для нормального распределения отклонению от среднего с вероятностью охвата приблизительно 95%.

Д3.12. Математическое примечание по стандартной неопределенности измерения отношения указываемых отношений сопротивления: Калибруемая и образцовая меры имеют близкие по значению сопротивления. В рамках общепринятой линейной аппроксимации отклонений, значения, получаемые из показаний DMM R_{iX} и R_{iS} , выражаются как:

$$\begin{aligned} R_X' &= R_{iX} \left(1 + \frac{\delta R_X'}{R} \right) \\ R_S' &= R_{iS} \left(1 + \frac{\delta R_S'}{R} \right) \end{aligned} \quad (\text{Д3.2})$$

где R есть номинальное значение сопротивления, а $\delta R_X'$ и $\delta R_S'$ – неизвестные отклонения. Это приводит к следующему выражению для отношения сопротивлений:

$$\frac{R_X'}{R_S'} = r r_C \quad (\text{Д3.3})$$

где отношение показаний калибруемого и образцового резисторов выражается как

$$r = \frac{R_{iX}}{R_{iS}} \quad (\text{Д3.4})$$

а фактор поправки (линейная аппроксимация отклонений)

$$r_C = 1 + \frac{\delta R_X' - \delta R_S'}{R} \quad (\text{Д3.5})$$

На основании того факта, что разница отклонений входит в выражение (Д3.5), коррелированные вклады систематических эффектов, получаемых из калибровки (внутренней шкалы) DMM, не оказывают влияния на результат. Стандартная неопределенность измерения фактора поправки определяется только через некоррелированные отклонения, которые возникают из-за паразитических эффектов и разрешения DMM. Допуская, что $u(\delta R_X') = u(\delta R_S') = u(\delta R')$, стандартная неопределенность измерения получается из следующего выражения:

$$u^2(r_C) = 2 \frac{u^2(\delta R')}{R^2} \quad (\text{Д3.6})$$

Д4. КАЛИБРОВКА КОНЦЕВОЙ МЕРЫ ДЛИНЫ (КМД) С НОМИНАЛЬНОЙ ДЛИНОЙ 50 ММ

Д4.1. Калибровка КМД 0-го класса точности (ИСО 3650) с номинальной длиной 50 мм выполняется методом сравнения, используя компаратор длины и в качестве эталонной меры откалиброванную КМД такой же номинальной длины и изготовленную из такого же материала, как калибруемая. Разница в срединных длинах определяется в вертикальном положении двух КМД используя два наконечника, касающихся верхней и нижней измерительных поверхностей (двухконтактный измерительный прибор). Действительная длина l'_x калибруемой КМД связана с действительной длиной l'_s эталонной КМД формулой:

$$l'_x = l'_s + \delta l \quad (\text{Д4.1})$$

где

δl – измеренная разница длин

l'_x и l'_s – длины КМД в реальных условиях измерения, особенно при температуре, которая из-за неопределенности измерения температуры в лаборатории может не совпадать с установленной (нормальной) температурой для измерения длины..

Д4.2. Длина l_x калибруемой КМД при нормальной температуре получается из соотношения:

$$l_x = l_s + \delta l_D + \delta l + \delta l_C - L(\bar{\alpha} \times \delta t + \delta \alpha \times \Delta \bar{t}) - \delta l_V \quad (\text{Д4.2})$$

где

l_s – длина эталонной КМД при установленной температуре 20°C в соответствии с ее свидетельством калибровки

δl_D – изменение длины эталонной КМД со времени ее последней калибровки вследствие дрейфа δl – видимая разница в длине между неопределенной и эталонной измерительной плитой

δl_C – наблюдаемая разница в длинах между калибруемой и эталонной КМД

L – номинальная длина КМД

$\bar{\alpha} = (\alpha_x + \alpha_s) / 2$ – среднее значение коэффициента температурного расширения калибруемой и эталонной КМД

$\delta t = (t_x - t_s)$ – разница в температурах между калибруемой и эталонной КМД

$\delta \alpha = \alpha_x - \alpha_s$ – разница между температурными коэффициентами расширения калибруемой и эталонной КМД

$\Delta \bar{t} = (t_x + t_s) / 2 - t_0$ – отклонение средней температуры калибруемой и эталонной КМД от установленной (нормальной)

δl_V – поправка из-за контакта не в центре измерительных поверхностей калибруемой КМД.

Д4.3. Эталонная КМД (l_s): Длина эталонной КМД и связанная с ней расширенной неопределенностью измерения указывается в свидетельстве калибровки на комплект КМД как 50,000 02 мм \pm 30 нм (коэффициент охвата $k = 2$).

Д4.4. Дрейф размера эталонной КМД (δl_D): Изменение во времени длины эталонной КМД оценивается из предыдущих калибровок значением "нуль" с максимальными от него отклонениями \pm 30 нм. Общий опыт с КМД этого типа указывает на то, что значение дрейфа равно нулю является наиболее вероятным и можно принять предположение о треугольном распределении возможных отклонений

Д4.5. Компаратор (δl_C): Проверяется перед калибровкой, чтобы компаратор длины соответствовал установленным требованиям в руководстве EAL - G21 по калибровке КМД. Отсюда может быть установлено, что для значений разницы длин D до ± 10 мкм поправка к показываемой разнице длин находится в пределах $\pm (30 \text{ нм} + 0,02|D|)$. Учитывая допуск на калибруемую КМД 0-го класса

точности и допуск на эталонную КМД класса точности К максимальная разница длин будет находиться в пределах ± 1 мкм, таким образом границы для поправки на нелинейность и смещение компаратора составят ± 32 нм.

Д4.6. Температурные поправки ($\bar{\alpha}, \delta t, \delta \alpha, \Delta \bar{t}$): перед проведением калибровки принимаются меры для обеспечения того чтобы КМД приняли температуру окружающего пространства. Оставшаяся разница в температурах между эталонной и калибруемой КМД находится на уровне $\pm 0,05$ К. На основании свидетельства калибровки эталонной КМД и данных производителя для калибруемой КМД коэффициент линейного температурного расширения стальных КМД принимается лежащим в пределе в пределе $(11,5 \pm 1,0) \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Для разницы в линейных коэффициентах температурного расширения при объединении двух прямоугольных распределений получается треугольное распределение с границами $\pm 2 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Так как оценки разницы линейных температурных коэффициентов расширения и отклонения средней температуры от установленной (нормальной) равны нулю, то при оценивании соответствующих вкладов в неопределенность необходимо учитывать члены второго порядка. Поэтому стандартная неопределенность произведения $\delta \alpha \times \Delta \bar{t}$ в выражении (Д4.2) получается как произведение стандартных неопределенностей, которые относятся к этим множителям (см. математическое примечание в параграфе Д4.13, выражение (Д4.5)). Окончательно это приводит к стандартной неопределенности $u(\delta \alpha \times \Delta \bar{t}) = 0,236 \times 10^{-6}$.

Д4.7. Контакт не в центре (δl_v): Для КМД 0-го класса точности разница длин, определенная из измерений в центре и четырех углах, должна лежать в пределах $\pm 0,12$ мкм (ИСО 3650). Предполагая, что такое изменение возникает на измерительных поверхностях вдоль короткого ребра длиной 9 мм и что срединная длина измеряется внутри окружности с радиусом 0,5 мм, поправка из-за контакта не в центре оценивается максимально как $\pm 6,7$ нм.

Д4.8. Корреляция: Входные величины рассматриваются как некоррелированные.

Д4.9. Измерения (δl): Для определения разницы между калибруемой и эталонной КМД было проведено пять наблюдений, причем перед каждым снятием отсчета компаратор вновь настраивался по эталонной КМД чтобы исключить смещение.

Номер наблюдения	Наблюдаемое значение
1	-100 нм
2	-90 нм
3	-80 нм
4	-90 нм
5	-100 нм

Среднее арифметическое значение: $\bar{\delta l} = -94$ нм

Суммарная оценка стандартного отклонения (получено из прошлой оценки): $s_p(\delta l) = 12$ нм

Стандартная неопределенность: $u(\delta l) = s(\bar{\delta l}) = \frac{12 \text{ нм}}{\sqrt{5}} = 5,37$ нм

Суммарная оценка стандартного отклонения получена из испытаний, проведенных для подтверждения соответствия использованного компаратора требованиям EAL-G21.

П4.10. Бюджет неопределенности (δl_x):

Величина X_i	Значение x_i	Стандартная неопределенность $u(x_i)$	Распределение вероятности	Коэффициент чувствительности c_i	Вклад в неопределенность $u_i(y)$
l_s	50,000 020 мм	15 нм	нормальное	1,0	15 нм
δl_D	0 мм	17,3 нм	треугольное	1,0	17,3 нм
δl	-0,000 094 мм	5,37 нм	нормальное	1,0	5,37 нм

δl_C	0 мм	18,5 нм	прямоугольное	1,0	18,5 нм
δt	0°C	0,0289 °C	прямоугольное	-575 нм °C ⁻¹	-16,6 нм
$\delta \alpha \times \Delta \bar{t}$	0	0,236 x 10 ⁻⁶	особое	50 мм	-11,8 нм
δl_V	0 мм	3, 87 нм	прямоугольное	-1,0	-3,87 нм
l_x	49,999 926 мм				36,4 нм

Д4.11. Расширенная неопределенность

$$U = k \times u(l_x) \approx 2 \times 3,64 \text{ нм} \approx 7,3 \text{ нм}$$

Д4.12. Полный результат измерения

Измеренное значение КМД с номинальным значением 50 мм составляет 49,999 926 мм ± 7,3 нм.

Указанная расширенная неопределенность получена умножением стандартной неопределенности измерения на коэффициент охвата $k = 2$. Она соответствует для нормального распределения отклонению от среднего с вероятностью охвата приблизительно 95%.

Д4.13. Математическое примечание по стандартной неопределенности произведения

двух величин со значениями математического ожидания "нуль": В случае произведения двух величин со значениями математических ожиданий равными нулю, необходимо отклониться от обычной процедуры для определения вкладов в неопределенность, которая основана на линеаризации функции модели. Если множители в произведении статистически независимы друг от друга и их математические ожидания отличаются от нуля, то квадрат относительной стандартной неопределенности (относительной дисперсии), связанной с произведением может выражаться без линеаризации через квадраты относительных стандартных неопределенностей, связанных с множителями:

$$w^2(x_1 + x_2) = w^2(x_1) + w^2(x_2) + w^2(x_1) \times w^2(x_2) \quad (\text{Д4.2})$$

При использовании определения относительной стандартной неопределенности измерения данное выражение можно легко преобразовать в общее выражение:

$$u^2(x_1 + x_2) = x_2^2 u^2(x_1) + x_1^2 u^2(x_2) + u^2(x_1) \times u^2(x_2) \quad (\text{Д4.3})$$

Если стандартные неопределенности $u^2(x_1)$ и $u^2(x_2)$, относящиеся к математическим ожиданиям x_1 и x_2 существенно меньше абсолютных значений соответствующих математических ожиданий, то третьим членом в правой части выражения можно пренебречь. Результирующее выражение представляет случай обработки общепринятым методом на основании линеаризации функции модели.

Однако если одно абсолютное значение математического ожидания, например $|x_2|$, существенно меньше своей стандартной неопределенности, или даже равно нулю, то можно пренебречь слагаемым правой части выражения, содержащим это математическое ожидание, но не третьим членом правой части выражения (Д4.3). Данное выражение теперь запишется в виде:

$$u^2(x_1 + x_2) \approx x_1^2 u^2(x_1) + x_2^2 u^2(x_2) + u^2(x_1) \times u^2(x_2) \quad (\text{Д4.4})$$

Если оба абсолютных значения математического ожидания существенно меньше их стандартных неопределенностей или даже равны нулю, то в качестве существенного вклада остается только третий член в выражении дает только третий терм уравнения (П4.3):

$$u^2(x_1 + x_2) \approx u^2(x_1) \times u^2(x_2) \quad (\text{Д4.5})$$

Д5. КАЛИБРОВКА ТЕРМОПАРЫ ТИПА N ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ 1 000° C

Д5.1. Термопара типа N калибруется сравнением с двумя эталонными термопарами типа R в горизонтальной печи при температуре 1 000 °C. ЭДС, создаваемое термопарой, измеряется цифровым вольтметром через селекторный переключатель полярности. Все свободные концы термопар термостатированы при 0°C (холодный спай). Калибруемая

термопара подключается к точкам сравнения с использованием компенсационных проводов. Значения температуры представлены в температурной шкале t_{90} .

Д5.2. Температура t_x горячего спая калибруемой термопары:

$$t_x = t_s \left(V_{iS} + \delta V_{iS1} + \delta V_{iS2} + \delta V_R - \frac{\delta t_{0S}}{C_{S0}} \right) + \delta t_S + \delta t_D + \delta t_F \cong$$

$$\cong t_s(V_{iS}) + C_S \cdot \delta V_{iS1} + C_S \cdot \delta V_{iS2} + C_S \cdot \delta V_R - \frac{C_S}{C_{S0}} \delta t_{0S} + \delta t_S + \delta t_D + \delta t_F$$

(Д5.1)

Д5.3. Напряжение V_X , возникающее в термопаре на свободных концах при 0°C (холодный спай) при калибровке определяется:

$$V_X(t) \cong V_X(t_x) + \frac{\Delta t}{C_X} - \frac{\delta t_{0X}}{C_{X0}} =$$

$$\cong V_{iX} + \delta V_{iX1} + \delta V_{iX2} + \delta V_R + \delta V_{LX} + \frac{\Delta t}{C_X} - \frac{\delta t_{0X}}{C_{X0}}$$

(Д5.2)

где:

$t_s(V)$ – температура эталонной термопары в точке измерения (горячий спай) при температуре свободных концов 0°C (холодный спай) зависимости от возникающего напряжения. Функция указана в свидетельстве калибровки;

V_{iS}, V_{iX} – показания вольтметра;

$\delta V_{iS1}, \delta V_{iX1}$ – поправка на напряжение из-за калибровки вольтметра;

$\delta V_{iS2}, \delta V_{iX2}$ – поправка на напряжение из-за конечного разрешения вольтметра;

δV_R – поправка на напряжение из-за контактных эффектов переключателя полярности;

$\delta t_{0s}, \delta t_{0x}$ – температурная поправка из-за отклонения эталонной температуры от 0°C ;

C_S, C_X – чувствительность термопар по напряжению при температуре измерения в $1\ 000^\circ\text{C}$;

C_{S0}, C_{X0} – чувствительность термопар по напряжению при температуре измерения в $1\ 000^\circ\text{C}$;

δt_D – изменение значений эталонной термопары с момента последней калибровки из-за дрейфа;

δt_F – поправка на температуру из-за неравномерности температуры печи;

t – температура, при которой совершается калибровка термопары (точка калибровки);

$\Delta t = t - t_x$ – отклонение температуры точки калибровки от температуры в печи;

δV_{LX} – поправка на напряжение из-за компенсационных проводов.

Д5.4. Полный результат измерения – значения ЭДС калибруемой термопары при заданной температуре ее рабочего конца (горячего спая). Так как измерительный процесс складывается из двух этапов – определения температуры печи и ЭДС калибруемой термопары, – оценивание измеряемого значения и соответствующей неопределенности состоит из двух частей.

Д5.5. Эталонные термопары (t_s, V): Эталонные термопары поставляются вместе со свидетельствами калибровки, в которых указывается температура точки измерения (горячего спая) при температуре свободных концов (холодного спая) 0°C в зависимости от напряжения на их электрических проводах. Соответствующая расширенная неопределенность измерения при 1000°C составит $U = 0,3^\circ\text{C}$ (коэффициент охвата $k = 2$).

Д5.6. Калибровка вольтметра ($\delta V_{iS1}, \delta V_{iX1}$): Вольтметр должен быть калиброван. Все считываемые с вольтметра значения напряжений вносят соответствующие поправки

(вклады в неопределенность). В свидетельстве калибровки при напряжении менее 50 мВ указано постоянное значение расширенной неопределенности измерения $U = 2,0$ мкВ (коэффициент охвата $k = 2$).

Д5.7. Разрешение вольтметра ($\delta V_{IS2}, \delta V_{IX2}$): 4 ½ -разрядный цифровой микровольтметр использовался в своем диапазоне 10 мВ, т.е. допустимые границы вариации каждого показания составят $\pm 0,5$ мкВ.

Д5.8. Паразитическое напряжение (δV_R): Остаточное паразитическое напряжение разбаланса, которое объясняется контактными напряжениями в переключателе, оценивается значением "нуль" (мкВ) с границами ± 2 мкВ.

Д5.9. Температура сравнения ($\delta t_{os}, \delta t_{ox}$): Температура в точке сравнения каждой термопары считается равной 0°C в пределах $\pm 0,1^\circ\text{C}$.

Д5.10. Чувствительность по напряжению (C_S, C_X, C_{SO}, C_{XO}): Чувствительность по напряжению термопар взята из таблиц:

	1 000°C	0°C
Эталонная термопара	$C_S = 0,077$ °C/мкВ	$C_{SO} = 0,189$ °C/мкВ
Калибруемая термопара	$C_X = 0,026$ °C/мкВ	$C_{SO} = 0,039$ °C/мкВ

Д5.11. Дрейф эталонной термопары (δt_D): При предыдущих калибровках дрейф эталонной термопары был оценен значением "нуль" с границами $\pm 0,3^\circ\text{C}$.

Д5.12. Температурная неоднородность (δt_F): Измерялся температурный градиент в печи. При 1000°C отклонения из-за неоднородности температуры в области измерений лежат в пределах $\pm 1^\circ\text{C}$.

Д5.13. Компенсационные провода (δV_{LX}): Компенсационные провода были исследованы в области от 0°C до 40°C . При этом разница напряжения между соединениями и термопарой оценивается в интервале ± 5 мкВ.

Д5.14. Наблюдения ($V_{IS}, t_S(V_{IS}), V_{IX}$): Для каждой термопары было проведено четыре измерения напряжения по нижеприведенному измерительному циклу, который позволяет уменьшить эффекты температурного дрейфа в источнике тепла и термическое паразитическое напряжение

1-ый цикл:

1-ая эталонная термопара, калибруемая термопара, 2-ая эталонная термопара,
2-ая эталонная термопара, калибруемая термопара, 1-ая эталонная термопара.

Обратная полярность

2-ой цикл:

1-ая эталонная термопара, калибруемая термопара, 2-ая эталонная термопара,
2-ая эталонная термопара, калибруемая термопара, 1-ая эталонная термопара

Д5.15. Этот способ пригоден, только когда наблюдаемая разность температур между обеими эталонными термопарами не превышает $\pm 0,3^\circ\text{C}$. Иначе необходимо повторить наблюдения и/или исследовать причины такой большой разницы температур.

Термопара	1-ая эталонная	калибруемая	2-ая эталонная
Показанное напряжение, исправленное	+10500 мкВ	+36245 мкВ	+10503 мкВ
	+10503 мкВ	+36248 мкВ	+10503 мкВ
	-10503 мкВ	-36248 мкВ	-10505 мкВ
	-10504 мкВ	-36251 мкВ	-10505 мкВ
Среднее значение напряжения	10502,5 мкВ	36248 мкВ	10504 мкВ
Температура точки измерения (горячего спая)	1000,4 °C		1000,6 °C
Температура печи		1000,5 °C	

Д5.16. Для четырех показаний, снятых с каждой термопары и представленных в вышеприведенной таблице, определялось среднее значение напряжения для каждой термопары. Средние значения напряжений эталонных термопар пересчитывались в температуру с помощью указанных в их свидетельствах калибровки зависимостей температура-напряжение. Наблюдаемые значения температуры сильно коррелированы (коэффициент корреляции почти единица). Температуру печи в месте размещения калибруемой термопары оценивали средним значением оценок напряжений эталонных термопар. Аналогичным образом находится наблюдаемое значение напряжения калибруемой термопары. Для оценки неопределенности наблюдения данных измерений при той же рабочей температуре проводились предварительные измерения, и была получена серия из десяти наблюдений при равенстве рабочих температур. Неопределенности оцениваются объединенными стандартными отклонениями результатов наблюдений температуры печи и напряжения калибруемой термопары.

Соответствующие стандартные неопределенности измерений измеренных величин следующие:

Суммарная оценка стандартного отклонения	$s_p(t_s) = 0,10 \text{ } ^\circ\text{C}$
Стандартная неопределенность	$u(t_s) = \frac{s_p(t_s)}{\sqrt{1}} = 0,10 \text{ } ^\circ\text{C}$
Суммарная оценка стандартного отклонения	$S_p(V_{IX}) = 1,6 \text{ мкВ}$
Стандартная неопределенность	$u(V_{IX}) = \frac{s_p(V_{IX})}{\sqrt{1}} = 1,6 \text{ мкВ}$

Д5.17. Бюджет неопределенности (температура t_x печи):

Величина x_i	Значение x_i	Стандартная неопределенность $u(x_i)$	Распределение вероятности	Коэффициент чувствительности c_i	Вклад в неопределенность $u_i(y)$
t_s	1000,5 $^\circ\text{C}$	0,10 $^\circ\text{C}$	нормальное	1,0	0,10 $^\circ\text{C}$
δV_{IS1}	0 мкВ	1,00 мкВ	нормальное	0,077 $^\circ\text{C}/\text{мкВ}$	0,077 $^\circ\text{C}$
δV_{IS2}	0 мкВ	0,29 мкВ	прямоугольное	0,077 $^\circ\text{C}/\text{мкВ}$	0,022 $^\circ\text{C}$
δV_R	0 мкВ	1,15 мкВ	прямоугольное	0,077 $^\circ\text{C}/\text{мкВ}$	0,089 $^\circ\text{C}$
δt_{os}	0 $^\circ\text{C}$	0,058 $^\circ\text{C}$	прямоугольное	-0,407	-0,024 $^\circ\text{C}$
δt_s	0 $^\circ\text{C}$	0,15 $^\circ\text{C}$	нормальное	1,0	0,15 $^\circ\text{C}$
δt_D	0 $^\circ\text{C}$	0,173 $^\circ\text{C}$	прямоугольное	1,0	0,173 $^\circ\text{C}$
δt_F	0 $^\circ\text{C}$	0,577 $^\circ\text{C}$	прямоугольное	1,0	0,577 $^\circ\text{C}$
t_X	1000,5 $^\circ\text{C}$				0,641 $^\circ\text{C}$

Д5.18. Бюджет неопределенности (ЭДС V_X калибруемой термопары):

Стандартная неопределенность измерения, связанная с отклонением температуры точки калибровки от температуры печи, оценивается стандартной неопределенностью измерения температуры печи, так как точка калибровки является определенным (точно известным) значением

Величина x_i	Значение x_i	Стандартная неопределенность $u(x_i)$	Распределение вероятности	Коэффициент чувствительности c_i	Вклад в неопределенность $u_i(y)$
V_{IX}	1,60 мкВ	1,60 мкВ	нормальное	1,0	1,60 мкВ
δV_{IX1}	1,60 мкВ	1,00 мкВ	нормальное	1,0	1,00 мкВ
δV_{IX2}	0 мкВ	0,29 мкВ	прямоугольное	1,0	0,29 мкВ
δV_R	0 мкВ	1,15 мкВ	прямоугольное	1,0	1,15 мкВ
δV_{LX}	0 мкВ	2,9 мкВ	прямоугольное	1,0	2,9 мкВ
Δt	0,5 $^\circ\text{C}$	0,641 $^\circ\text{C}$	нормальное	38,5 мкВ/ $^\circ\text{C}$	24,5 мкВ
δt_{ox}	0 $^\circ\text{C}$	0,058 $^\circ\text{C}$	прямоугольное	-25,6 мкВ/ $^\circ\text{C}$	-1,48 мкВ
V_X	36 229 мкВ				25,0 мкВ

Д5.19. Расширенная неопределенность

Расширенная неопределенность измерения температуры печи определяется как:

$$U = k \times u(t_x) = 2 \times 0,641 \text{ } ^\circ\text{C} \approx 1,3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Расширенная неопределенность, соответствующая значению ЭДС калибруемой термопары, составит:

$$U = k \times u(V_x) = 2 \times 25,0 \text{ мкВ} \approx 50 \text{ мкВ}$$

Д5.20. Полный результат измерения:

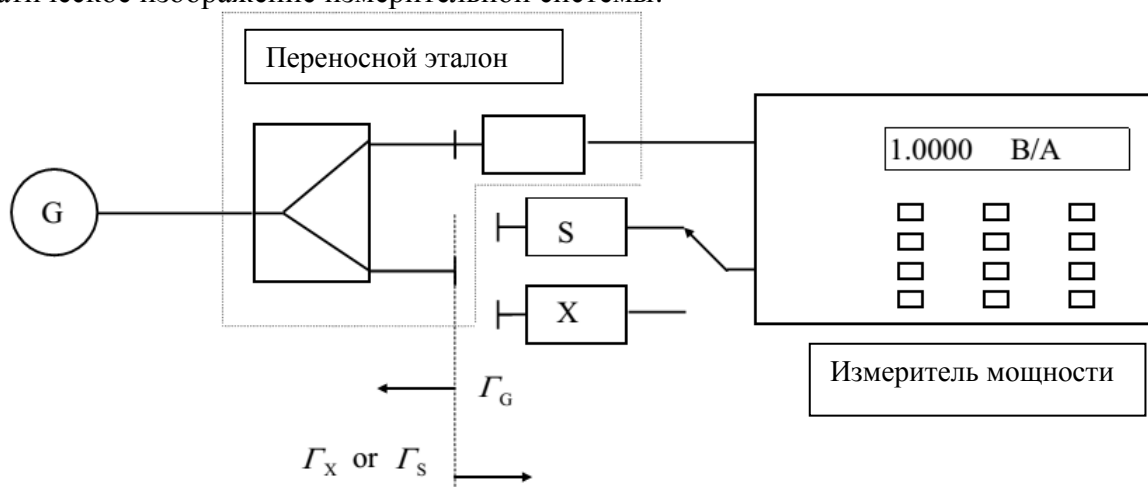
ЭДС термопары типа N составила 36230 мкВ ± 50 мкВ при температуре рабочего конца 1000,0°C и температуре свободных концов 0°C.

Указанная расширенная неопределенность получена умножением стандартной неопределенности измерений на коэффициент охвата $k = 2$. Она соответствует для нормального распределения отклонению от среднего с вероятностью охвата приблизительно 95%.

Д6. КАЛИБРОВКА ДАТЧИКА МОЩНОСТИ ЧАСТОТОЙ 19 ГГц

Д6.1. При калибровке проводится сравнение высокочастотного датчика мощности с калиброванным датчиком мощности, используемым в качестве эталонного, через метод замещения с применением стабильного переносной эталона с известным маленьким коэффициентом отражения. Проводится измерение фактора калибровки, который определяется как отношение мощности падающей волны при эталонной частоте в 50 МГц к мощности падающей волны при калибруемой частоте при условии, что обе мощности падающей волны приводятся к равным выходным сигналам датчиков мощности. При калибровочной и эталонной частотах для калибруемого и эталонного датчиков соответственно отношение мощностей определяется относительно встроенного датчика в переносном эталоне с двухканальным измерителем мощности, который непосредственно показывает отношение мощностей.

Д6.2. Схематическое изображение измерительной системы:



Д6.3. Величина K , которая различными производителями называется "коэффициент калибровки", при условии равенства показаний измерителя мощности определяется как:

$$K = \frac{P_{Ir}}{P_{Ic}} = \frac{(1 + |\Gamma_r|^2) P_{Ar}}{(1 + |\Gamma_c|^2) P_{Ac}} \quad (\text{Д6.1})$$

где:

P_{Ir} – мощность падающей волны при эталонной частоте (50 МГц);

P_{Ic} – мощность падающей волны при частоте калибровки;

Γ_r – коэффициент отражения датчика при эталонной частоте;

Γ_c - коэффициент отражения датчика при частоте калибровки;
 P_{Ar} – поглощенная мощность датчика при эталонной частоте;
 P_{Ac} – поглощенная мощность датчика при частоте калибровки.

Д6.4. Коэффициент калибровки калибруемого датчика рассчитывается из зависимости:

$$K_X = (K_S + \delta K_D) \frac{M_{Sr} M_{Xc}}{M_{Sc} M_{Xr}} p_{Cr} p_{Cc} p \quad (\text{Д6.2})$$

где:

K_S – коэффициент калибровки эталонного датчика мощности;
 δK_D – изменение фактора калибровки эталонного датчика мощности с момента последней калибровки из-за дрейфа;
 M_{Sr} – коэффициент рассогласования эталонного датчика при эталонной частоте;
 M_{Sc} – коэффициент рассогласования эталонного датчика при частоте калибровке;
 M_{Xr} - коэффициент рассогласования калибруемого датчика при эталонной частоте;
 M_{Xc} - коэффициент рассогласования калибруемого датчика при частоте калибровки;
 p_{Cr} – поправка на наблюдаемое отношение мощностей из-за нелинейности и конечного разрешения измерителя мощности при эталонной частоте;
 p_{Cc} - поправка на наблюдаемое отношение мощностей из-за нелинейности и конечного разрешения измерителя мощности при частоте калибровки;

$p = \frac{P_{Sr} P_{Xc}}{P_{Sc} P_{Xr}}$ – наблюдаемое отношение мощностей, которое включает в себя:

p_{Sr} – показываемое отношение мощностей для эталонного датчика при эталонной частоте;
 p_{Sc} - показываемое отношение мощностей для эталонного датчика при частоте калибровки;
 p_{Xr} – показываемое отношение мощностей для калибруемого датчика при эталонной частоте;
 p_{Xc} - показываемое отношение мощностей для калибруемого датчика при частоте калибровки.

Д6.5. Эталонный датчик (K_S): Эталонный датчик был калиброван шесть месяцев назад. В свидетельстве калибровки указано значение фактора калибровки равное $(95,7 \pm 1,1)\%$ (коэффициент охвата $k = 2$); это значение представим в виде $0,957 \pm 0,011$.

Д6.6. Дрейф эталонного датчика (δK_D): Дрейф фактора калибровки эталонного датчика оценен на основании ежегодной калибровки как $-0,002$ в год с отклонением $\pm 0,004$. Из этого значения определяем дрейф эталонного датчика, который калибровался полгода назад, как $-0,001$ с максимальным отклонением $\pm 0,002$.

Д6.7. Линейность и разрешение измерителя мощности (p_{Cr} , p_{Cc}): Расширенная неопределенность, связанная с показаниями измерителя мощности из-за его нелинейности, составит $0,002$ (коэффициент охвата $k = 2$) и $0,0002$ (коэффициент охвата $k = 2$) при отношении мощностей на уровне эталонной частоты и при отношении мощностей на уровне частоты калибровки соответственно. Эти величины были определены из предыдущих измерений. Так как один и тот же измеритель мощности использовался для получения наблюдений p_{Cr} и p_{Cc} , то вклады в неопределенность при эталонной частоте и частоте калибровки будут коррелированы. Отношения мощностей определялись при разных частотах, чтобы уменьшить неопределенность измерения из-за эффекта корреляции. Поэтому должна приниматься во внимание только относительная разность в показаниях для компенсации систематических эффектов (смотри математические ссылки в разделе Д3.12). Это приводит к тому, что стандартная

неопределенность, связанная с поправкой p_{Cr} , равна 0,00142 и стандартная неопределенность, связанная с поправкой p_{Cc} , равна 0,000142.

Указанная расширенная неопределенность показаний измерителя мощности включает эффекты из-за нелинейности и разрешения. Эффекты из-за нелинейности будут коррелированы, в то время как эффекты из-за разрешения не коррелированы. Как показано в Д3.12, формирование отношения мощностей ликвидирует влияние корреляции и дает уменьшенную стандартную неопределенность, связанную с данным отношением мощностей. Однако в вышеприведенном расчете не известны по отдельности коррелированные и некоррелированные вклады и указанные значения являются верхними границами для стандартной неопределенности отношения мощностей. В заключение бюджет неопределенности показывает, что вклады неопределенностей отношения мощностей являются незначительными, т.е. приближение является обоснованным.

Д6.8. Коэффициент рассогласования (M_{Sr} , M_{Sc} , M_{Xr} , M_{Xc}): Так как система переносного эталона не в полной мере согласована и фаза коэффициента отражения переносного эталона, калибруемого и эталонного датчиков мощности не известна, то существует неопределенность из-за возможного рассогласования для каждого датчика при эталонной частоте и частоте калибровки. Соответствующие границы отклонений определяются как для эталонной частоты, так и для частоты калибровки по следующему выражению:

$$M_{S,X} = 1 \pm 2|G_G| \cdot |G_{S,X}| \quad (Д6.3)$$

Величины коэффициентов отражения переносного эталона, калибруемого и эталонного датчиков мощности будут следующими:

	50 МГц	18 ГГц
$ G_G $	0.02	0.07
$ G_S $	0.02	0.10
$ G_X $	0.02	0.12

Распределение вероятностей отдельного вклада является U-образным. Это учитывается тем, что при вычислении дисперсии через квадрат полуширины установленных границ коэффициент 1/3 в выражении для прямоугольного распределения заменяется на коэффициент 1/2 для действительного распределения U-формы. Поэтому стандартная неопределенность измерения из-за рассогласования равна:

$$u(M_{S,X}) = \frac{2|G_G| \cdot |G_{S,X}|}{\sqrt{2}} \quad (Д6.4)$$

Примечание: значения коэффициентов отражения являются результатами измерений, которые сами обладают неопределенностью. Это принимается во внимание

суммированием квадратного корня из суммы квадратов неопределенностей измерения и квадратов измеренных значений.

Д6.9. Корреляция: Входные величины рассматриваются как некоррелированные.

Д6.10. Наблюдения: Было получено три независимых показания. Для того чтобы учесть повторяемость из-за соединительных линий, как эталонный, так и калибруемый датчики присоединялись к переносному эталону, а затем снова отсоединялись.

Для расчета наблюдаемых отношений мощностей p использовались следующие показания измерителя мощности:

Номер наблюдения	P_{Sr}	P_{Sc}	P_{Xr}	P_{Xc}	p
1	1,0001	0,9924	1,0001	0,9698	0,9772
2	1,0000	0,9942	1,0000	0,9615	0,9671
3	0,9999	0,9953	1,0001	0,9792	0,9836

Среднее арифметическое значение: $\bar{p} = 0,9760$

Экспериментальное стандартное отклонение: $s(p) = 0,0083$

Стандартная неопределенность измерения: $u(p) = s(\bar{p}) = \frac{0,0083}{\sqrt{3}} = 0,0048$

Д6.11. Бюджет неопределенности (K_x):

Величина X_i	Оценка x_i	Стандартная неопределенность $u(x_i)$	Распределение	Коэффициент чувствительности c_i	Вклад в неопределенность $u_i(y)$
K_S	0,957	0,0055	нормальное	0,976	0,00537
δK_D	-0,001	0,0012	прямоугольное	0,976	0,00113
M_{Sr}	1,000	0,0006	U-формы	0,933	0,00053
M_{Sc}	1,000	0,0099	U-формы	-0,933	0,00924
M_{Xr}	1,000	0,0006	U-формы	-0,933	-0,00053
M_{Xc}	1,000	0,0119	U-формы	0,933	0,01110
P_{Cr}	1,000	0,0014	нормальное	0,933	0,00131
P_{Cc}	1,000	0,0001	нормальное	0,933	0,00013
p	0,976	0,0048	нормальное	0,956	0,00459
K_x	0,933				0,01619

Д6.12. Расширенная неопределенность:

$$U = k \cdot u(K_x) = 2 \cdot 0,0162 \cong 0,032$$

Д6.13. Полный результат измерения:

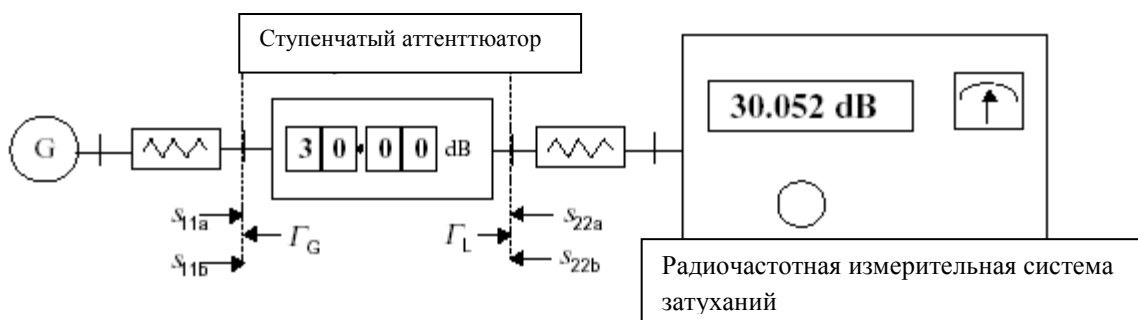
Фактор калибровки датчика мощности при 18 ГГц составит $0,933 \pm 0,032$. Представим это значение в форме $(93,3 \pm 3,2)\%$.

Указанная расширенная неопределенность получена умножением стандартной неопределенности измерений на коэффициент охвата $k = 2$. Она соответствует для нормального распределения отклонению от среднего с вероятностью охвата приблизительно 95%.

Д7. КАЛИБРОВКА СТУПЕНЧАТОГО КООКСИАЛЬНОГО АТТЕНЮАТОРА ДЛЯ ОСЛАБЛЕНИЯ 30 ДБ

Д7.1. Калибровка ступенчатого коаксиального аттенюатора осуществляется при 10 ГГц с помощью измерительной системы затухания, которая содержит калиброванный ступенчатый аттенюатор, выступающий в роли эталона. Метод измерения заключается в установлении затухания между согласованным источником и согласованной нагрузкой. Калибруемый ступенчатый аттенюатор может устанавливаться в диапазоне от 0 дБ до 30 дБ, при этом определяется значение затухания для установленной ступени. Измерительная система затухания имеет цифровой отсчет для значений затухания и аналоговый индикатор нуля для установления условия баланса.

Д7.2. Схематичное представление измерительной системы



Д7.3. Затухание L_X калибруемого ступенчатого аттенюатора определяется из зависимости:

$$L_X = L_S + \delta L_S + \delta L_D + \delta L_M + \delta L_K + \delta L_{ib} - \delta L_{ia} + \delta L_{0b} - \delta L_{0a} \quad (Д7.1)$$

где

$L_S = L_{ib} - L_{ia}$ – разница затуханий эталонного ступенчатого аттенюатора, состоящая из:

L_{ia} – показанного значения затухания калибруемого ступенчатого аттенюатора, установленного на 0 дБ;

L_{ib} – показанного значения затухания калибруемого ступенчатого аттенюатора, установленного на 30 дБ;

δL_S – поправка из-за калибровки эталонного ступенчатого аттенюатора;

δL_D – поправка из-за дрейфа, обусловленного изменением значений затухания эталонного ступенчатого аттенюатора с момента последней калибровки;

δL_M – поправка на потери из-за рассогласования;

δL_K – поправка из-за перекрестной модуляции (или «из-за дефектов изоляции», или «на рассеяние сигнала») между входом и выходом калибруемого аттенюатора;

$\delta L_{ia}, \delta L_{ib}$ – поправка из-за конечного разрешения эталонного датчика в диапазоне от 0 дБ до 30 дБ;

$\delta L_{0a}, \delta L_{0b}$ – поправка из-за конечного разрешения индикатора нуля в диапазоне от 0 дБ до 30 дБ.

Д7.4. Эталонный ступенчатый аттенюатор (δL_S): В свидетельстве калибровки на эталонный ступенчатый аттенюатор дано значение затухания 30,003 дБ при установке 30,000 дБ на 10 ГГц с соответствующей расширенной неопределенностью измерения 0,005 дБ (коэффициент охвата $k=2$). Поправка + 0,003 дБ с соответствующей расширенной неопределенностью измерения 0,005 дБ (коэффициент охвата $k = 2$) установлена для значений затухания эталонного ступенчатого аттенюатора, которые отличаются не более чем на $\pm 0,1$ дБ от установленного при калибровке значения 30,000 дБ.

Д7.5. Дрейф эталона (δL_D): Дрейф значений затухания эталонного ступенчатого аттенюатора оценивается на основании практики его калибровки значением "нуль" с максимальными отклонениями $\pm 0,002$ дБ.

Д7.6. Потеря из-за рассогласования (δL_M): Коэффициенты отражения источника и нагрузки в месте расположения калибруемого ступенчатого аттенюатора можно оптимизировать через подбор импедансов к насколько возможно малым величинам. Проводится измерение этих величин и величин коэффициентов рассеяния калибруемого ступенчатого аттенюатора, однако их фаза остается неизвестной. Без информации о фазе нельзя получить поправку для ошибки рассогласования; стандартная неопределенность (в дБ) из-за неполного знания о согласовании определяется по нижеприведенному выражению [1]:

$$u(\delta L_M) = \frac{8,686}{\sqrt{2}} \sqrt{|\Gamma_S|^2 (|s_{11a}|^2 + |s_{11b}|^2) + |\Gamma_L|^2 (|s_{22a}|^2 + |s_{22b}|^2) + |\Gamma_S|^2 \cdot |\Gamma_L|^2 (|s_{21a}|^4 + |s_{21b}|^4)}$$

(Д7.2)

с коэффициентами отражения нагрузки и источника

$$\Gamma_L = 0,03 \text{ и } \Gamma_S = 0,03$$

и коэффициентами рассеяния калибруемого шагового аттенюатора (на 10 ГГц)

	0 дБ	30 дБ
s_{11}	0.05	0.09
s_{22}	0.01	0.01
s_{21}	0.95	0.031

что дает стандартную неопределенность измерения $u(\delta L_M) = 0,02$ дБ.

Примечание: значения коэффициентов рассеяния и отражения являются результатами измерения. Поэтому они сами не точно известны. Это учитывается через сложение квадратного корня из суммы квадратов стандартных неопределенностей измерения и квадратов соответствующих измеренных значений.

Д7.7. Поправка на перекрестную модуляцию (δL_K): Перекрестная модуляция в калибруемом аттенуаторе из измерений при установке 0 дБ оценивается по крайней мере на 100 дБ меньше, чем измерительный сигнал. Поправка из-за перекрестной модуляции (рассеяния сигналов) при установке 30 дБ оценивается из этих данных в пределах $\pm 0,003$ дБ.

Д7.8. Разрешение установки эталонного ступенчатого аттенуатора ($\delta L_{ia}, \delta L_{ib}$): Цифровой отсчет эталонного ступенчатого аттенуатора имеет разрешение 0,001 дБ и отсюда поправка на разрешение оценивается в пределах $\pm 0,0005$ дБ.

Д7.9. Разрешение индикатора нуля ($\delta L_{0a}, \delta L_{0b}$): Разрешение индикатора нуля для приборов измеряющих затухание установлено при предыдущих измерениях. При предположении нормального закона распределения установлено стандартное отклонение для каждого показания 0,002 дБ.

Д7.10. Корреляция: Входные величины рассматриваются как некоррелированные.

Д7.11. Наблюдения (L_S): Для ступени затухания в 30 дБ было получено четыре наблюдения при установке калибруемого ступенчатого аттенуатора на 0 дБ и на 30 дБ:

Номер наблюдения	Наблюдаемое значение при	
	установка 0 дБ	установка 30 дБ
1	0,000 дБ	30,033 дБ
2	0,000 дБ	30,058 дБ
3	0,000 дБ	30,018 дБ
4	0,000 дБ	30,052 дБ

Среднее арифметическое значение: $\bar{L}_S = 30,040$ дБ

Экспериментальное стандартное отклонение: $s(L_S) = 0,018$ дБ

Стандартная неопределенность измерения: $u(L_S) = s(\bar{L}_S) = \frac{0,018 \text{ дБ}}{\sqrt{4}} = 0,009$ дБ

7.12. Бюджет неопределенности (L_x):

Величина X_i	Оценка x_i	Стандартная неопределенность $u(x_i)$	Распределение	Коэффициент чувствительности c_i	Вклад в неопределенность $u_i(y)$
L_S	30,040 дБ	0,0090 дБ	нормальное	1,0	0,0090 дБ
δL_S	0,003 дБ	0,0025 дБ	нормальное	1,0	0,0025 дБ
δL_D	0 дБ	0,0011 дБ	прямоугольное	1,0	0,0011 дБ
δL_M	0 дБ	0,0200 дБ	прямоугольное	1,0	0,0200 дБ
δL_K	0 дБ	0,0017 дБ	прямоугольное	1,0	0,0017 дБ
δL_{ia}	0 дБ	0,0003 дБ	прямоугольное	-1,0	-0,0003 дБ
δL_{ib}	0 дБ	0,0003 дБ	прямоугольное	1,0	0,0003 дБ
δL_{0a}	0 дБ	0,0020 дБ	нормальное	-1,0	-0,0020 дБ
δL_{0b}	0 дБ	0,0020 дБ	нормальное	1,0	0,0020 дБ
L_X	30,043 дБ				0,0224 дБ

7.13. Расширенная неопределенность:

$$U = k \cdot u(L_X) = 2 \cdot 0,0224 \text{ дБ} \cong 0,045 \text{ дБ}$$

7.14. Полный результат измерения:

Измеренное значение шагового аттенюатора при установке на 30 дБ при 10 ГГц составило $(30,043 \pm 0,045)$ дБ.

Указанная расширенная неопределенность получена умножением стандартной неопределенности измерений на коэффициент охвата $k = 2$. Она соответствует для нормального распределения отклонению от среднего с вероятностью охвата приблизительно 95%.

7.15. Использованная литература

Harris I.A., Warner F.L. Re-examination of mismatch uncertainty when measuring microwave power and attenuation. In: IEE Proc., Vol. 128, Pt. H, No 1, Febr. 1981 (Наррис И.А., Варнер Ф.Л.: Повторное исследование неопределенности рассогласования при измерении мощности и затухания микроволн).

ДОПОЛНЕНИЕ 2
ПРИМЕРЫ

СОДЕРЖАНИЕ

Д8. Введение

Д9. Калибровка портативного цифрового мультиметра в точке диапазона 100 В

Д10. Калибровка штангенциркуля

Д11. Калибровка калибратора температур при температуре 180°C

Д.12. Калибровка бытового счетчика воды

Д13. Калибровка меры внутреннего диаметра с номинальным диаметром 90 мм

Д8. Введение

Д8.1. Следующие примеры были выбраны для наглядной демонстрации метода оценки неопределенности измерений. Они дополняют примеры, приведенные в Приложении 1 к EA-4/02 (ранее EAL-R2) (Издание 1, ноябрь 1997). Представленные здесь примеры сконцентрированы на ситуациях, когда один или два вклада в неопределенность измерения доминируют или когда число повторных измерений мало.

Д8.2. Выбранные примеры иллюстрируют ситуации, встречающиеся на практике. Однако следует подчеркнуть, что при практическом применении нет необходимости проходить через математические выводы, указанные в этих примерах, особенно в математических примечаниях, дополняющих некоторые из них. Пользователю рекомендуется использовать результаты теоретических изложений, после его ознакомления с условиями, которые должны соблюдаться. Например, если для данной ситуации установлено, что результат измерения имеет прямоугольное распределение (как будет в случае, когда только один вклад, имеющий прямоугольное распределение, может приниматься во внимание при использовании закона распространения неопределенностей), можно сделать заключение об использовании коэффициент охвата $k = 1,65$, соответствующего вероятности охвата 95% (см. Д9.14).

Д8.3. Основной вывод, который можно сделать для распространения неопределенностей: в случае только одного доминирующего вклада вид распределения этого вклада может приписываться результату измерения. Однако, как обычно, для оценки неопределенности результата измерения нужно использовать соответствующий коэффициент чувствительности.

Д8.4. Добавим, что ситуации, когда есть только один или несколько доминирующих вкладов в неопределенность измерения, часто встречаются в связи с простыми измерительными приборами, где доминирующие вклады часто определяются предельным разрешением прибора. Может поэтому появляться парадокс, что рассмотрение неопределенности измерения для простых приборов – как показано в примерах этого приложения – более сложное, чем рассмотрение большинства ранее представленных примеров в Приложении 1. Однако следует принять во внимание, что математические производные, которые могут быть сложными для понимания, приведены с познавательной целью в местах, где они необходимы, вместо представления их в основном документе.

Д8.5. Примеры основаны на проектах, подготовленных группой экспертов Европейской организации по аккредитации (EA). Эти проекты упрощены и согласованы, чтобы сделать их понятными для сотрудников лаборатории во всех областях калибровки. Мы надеемся, что эта группа примеров, как и предыдущая, опубликованная в Приложении 1 к EAL-R2, будет способствовать лучшему пониманию деталей формирования модели оценивания и согласованию процесса оценивания неопределенности измерения независимо от области калибровки.

Д8.6. Вклады в неопределенность и значения, приведенные в примерах, не представляют собой обязательные или типичные требования. Лаборатории должны определять вклады в неопределенность на основании функциональной модели, которую они используют при обработке результатов проводимой ими калибровки, и которую указывают в выдаваемых свидетельствах калибровки для установления неопределенности измерений.

Д8.7. Примеры приведены в соответствии с общепринятой схемой, которая представлена для ознакомления в первом Приложении к EAL-R2. Подробности читатель найдет в разделе Д1.4 этого документа.

Д8.8. Анализ неопределенности в примерах проведен для представления основ конкретного процесса измерения и метода нахождения результатов измерения и соответствующих неопределенностей. Чтобы обеспечить ясность анализа также для тех, кто не является экспертом в упомянутых областях метрологии, была сформирована унифицированная номенклатура для выбора символов величин, относящаяся больше к физическим аспектам, чем к различным областям общепринятой практики.

Д8.9. В большинстве случаев некоторые величины подобного характера встречаются повторно. Одни из них являются измеряемыми, т.е. величинами, полученными при измерениях, другие – величинами, которые определяются рабочими эталонами, воспроизводящими локальную единицу; с этими величинами сравниваются измеряемые. Наряду с этими двумя величинами во всех случаях существуют еще другие, которые выполняют роль дополнительной локальной величины или поправки.

Д8.10. Поправки описывают несоответствия между измеряемыми величинами и результатом измерения. Некоторые поправки получают через полное представление результата измерения, т.е. измеренное значение и соответствующую неопределенность измерения. Для других распределение величин предполагается на основании более или менее полных знаний о их природе. В большинстве случаев это приведет к оценке предельных значений для неизвестных отклонений

Д8.11. В определенных случаях величины, определяемые рабочими эталонами, характеризуются через номинальное значение эталона. Поэтому номинальные значения, которые, вообще говоря, характеризуют или идентифицируют объекты калибровки, зачастую входят в анализ неопределенности.

Д8.12. С целью различия математических моделей оценок между этими концепциями примеры оформлены в соответствии с правилами обозначений, приведенными ниже. Однако очевидно, что невозможно точно следовать этим правилам, потому что практика применения символов различна в различных областях метрологии.

Д8.13. Приведенные здесь обозначения различаются между главными значениями, номинальными значениями, поправками и граничными значениями:

Главные значения – это измеренные или наблюдаемые значения, которые составляют существенную часть значения измеряемой величины. Они обозначаются курсивными строчными буквами; если величина определяется через разность, то перед ней ставится прописная греческая буква «дельта».

ПРИМЕР:

t_x – температура, показанная калибруемым термометром X (индекс i обозначает показание);

Δl – наблюдаемая разница длин при перемещении измерительного шпинделя.

Номинальное значение является установленным значением при реализации величины эталоном или измерительным прибором. Это приближенные к измеряемой величине значения, которые составляют основную часть определяемой величины. Они обозначаются через курсивные прописные буквы.

ПРИМЕР:

L – номинальная длина калибруемых концевых мер.

Поправки определяют наименьшее отклонение от главных значений, которые известны или должны быть оценены. В большинстве случаев они аддитивны. Они обозначаются через символы, выбранные для рассматриваемых величин, перед которыми ставится маленькая греческая буква «дельта».

ПРИМЕР:

δt_D – возможное отклонение из-за дрейфа значения эталонной гири с момента последней калибровки;

δt_C – поправка на эксцентриситет нагрузки и магнитные эффекты при калибровке гири.

Граничные значения оцениваются как постоянные, характеризующие область, в которой могут находиться неизвестные значения величины. Они обозначаются через символы, выбранные для рассматриваемых величин, перед которыми ставится большая греческая буква "дельта".

ПРИМЕР:

$\Delta \alpha_x$ – оцененная полуширина интервала возможных отклонений линейного температурного коэффициента сопротивления, который указывается в спецификации производителя на калибруемый резистор.

Как показано в примерах, различия между разными величинами одного вида обозначаются через индексы. При этом можно пользоваться международно согласованным правилом обозначения для физических величин: индексы, обозначающие физические величины, пишутся курсивом; индексы, обозначающие объекты, приборы и т.п., пишутся прямым шрифтом.

Д8.14. Эталонное значение обозначается через символ величины с индексом ноль.

ПРИМЕР:

p_0 – эталонное давление, например в 1000 мбар

Д8.15. Отношения величин одного вида (безразмерные отношения) обозначаются курсивными строчными буквами.

ПРИМЕР:

$r = R_{iX} / R_{iN}$ – отношение показанных значений сопротивления неизвестным резистором и эталонным резистором (индекс i обозначает показания).

Д8.16. При употреблении нескольких индексов их последовательность выбирается так, чтобы индекс, обозначающий общее понятие, стоял слева, а индекс, обозначающие специальные понятия – справа.

ПРИМЕР:

V_{i1}, V_{i2} – напряжение, показываемое вольтметрами 1 и 2, соответственно (индекс i обозначает показания).

Д8.17. Намечено продлить примеры данного второго дополнения к EAL-R2 последующими, иллюстрирующими различные аспекты, возникающие в связи с калибровкой измерительных приборов. Примеры можно найти также в EAL и Руководящих документов EA¹, посвященных калибровке определенных видов измерительного оборудования.

Д9. КАЛИБРОВКА ПОРТАТИВНОГО ЦИФРОВОГО МУЛЬТИМЕТРА В ТОЧКЕ ДИАПАЗОНА 100 В

Д9.1. Как часть общей калибровки, портативный цифровой мультиметр (ПЦМ) калибруется при подаче входного напряжения постоянного тока величиной 100 В с использованием многофункционального калибратора в качестве рабочего эталона. Используется следующая процедура измерения:

- (1) выходные клеммы калибратора соединяются с входными клеммами мультиметра, используя подходящие измерительные провода.

¹ EAL-G26, Калибровка прессовых весов

EAL-G31, Калибровка термопар

EAL-G32, Измерение и генерация малых вольтметров переменного тока с индуктивным делителем напряжения

EA-10/10, EA Руководство по определению диаметра делительной окружности цилиндрической резьбы калибра при механическом исследовании

(2) калибратор устанавливается на 100В, и после необходимого периода стабилизации снимаются показания.

(3) отклонение показаний ПЦМ рассчитывается, используя показания ПЦМ и параметры настройки калибратора.

Д9.2. Необходимо отметить, что отклонение показаний ПЦМ, полученное с помощью такой процедуры измерения, включает эффект смещения и отклонения от линейности.

Д9.3. Отклонение показаний калибруемого мультиметра E_x состоит из

$$E_x = V_{iX} - V_S + \delta V_{iX} - \delta V_S \quad (\text{Д9.1})$$

где

V_{iX} – напряжение, показанное мультиметром (индекс i означает показание);

V_S – напряжение, генерируемое калибратором;

δV_{iX} – поправка показанного напряжения для конечного разрешения ПЦМ;

δV_S – поправка напряжения калибратора из-за:

- (1) его дрейфа со времени последней калибровки,
- (2) отклонения из-за комбинированного эффекта смещения, нелинейности и разницы коэффициентов усиления,
- (3) отклонения в температуре окружающей среды,
- (4) отклонения в напряжении сети,

эффекта недостаточно тщательной настройки из-за конечного входного сопротивления калибруемого ПЦМ.

Д9.4. Из-за ограниченной разрешающей способности индикации ПЦМ не наблюдалось рассеивания в показываемых значениях.

Д9.5. Показания мультиметра (V_{iX}): ПЦМ показывает напряжение 100,1 В при установлении на калибраторе 100 В. Показания принимаются как точные (см. Д9.4).

Д9.6. **Рабочий эталон** (V_S): В свидетельстве калибровки на многофункциональный калибратор указано, что сгенерированное напряжение есть значение, показанное настроенным калибратором, и что связанная с ним относительная расширенная неопределенность измерения составляет $W = 0,00002$ (коэффициент охвата $k = 2$), что дает при установке 100 В расширенную неопределенность измерения $U = 0,002$ В (коэффициент охвата $k = 2$).

Д9.7. **Разрешающая способность калибруемого ПЦМ** (δV_{iX}): Наименьший значимый разряд табло ПЦМ соответствует разрешающей способности 0,1 В. Каждое показание ПЦМ имеет поправку из-за конечной разрешающей способности дисплея, которая оценивается как 0,0 В с границами

$\pm 0,05$ В (то есть половина величины наименьшего значимого разряда).

Д9.8. Другие поправки (δV_S): Так как не имеется индивидуальных данных, неопределенность измерения, связанную с различными источниками, получают из спецификаций изготовителя калибратора. Эти спецификации устанавливают, что сгенерированное калибратором напряжение совпадает с установленным на калибраторе в пределах $\pm (0,0001V_S + 1 \text{ мВ})^2$ при соблюдении условий измерения:

- (1) температура окружающей среды лежит в диапазоне от 18°C до 23°C,
- (2) напряжение питания сети калибратора находится в диапазоне от 210 В до 250 В,
- (3) сопротивление нагрузки на клеммах генератора более чем 100 кОм,
- (4) время, прошедшее с момента последней калибровки калибратора, не более года.

Так как эти условия измерения выполнены, и практика калибровки калибратора показывает, что на спецификацию изготовителя можно полагаться, поправка, которую нужно применить к сгенерированному калибратором напряжению, принимается 0,0 В в пределах $\pm 0,011$ В.

Д9.9. Корреляции: Входные величины рассматриваются как некоррелированные.

Д9.10. Бюджет неопределенности (E_X):

Величина X_i	Оценка x_i	Стандартная неопределенность $u(x_i)$	Распределение	Коэффициент чувствительности c_i	Вклад в неопределенность $u_i(y)$
V_{iX}	100,1 В	-	-	-	-
V_S	100 В	0,001 В	нормальное	-1,0	-0,001 В
δV_{iX}	0,0 В	0,029 В	прямоугольное	1,0	0,029 В
δV_S	0,0 В	0,0064 В	прямоугольное	-1,0	-0,0064 В
E_X	0,1 В				0,030 В

Д9.11. Расширенная неопределенность. В стандартной неопределенности измерения, связанной с результатом измерения, доминирует эффект из-за конечной разрешающей способности ПЦМ. Конечное распределение не является нормальное, а по существу прямоугольной формы. Следовательно, метод эффективных степеней свободы, описанный в Приложении Е к EAL-R2 не применим. Коэффициент охвата, соответствующий прямоугольному распределению, вычислен из выражения (Д9.8) в математическом примечании Д9.14.

$$U = k \cdot u(E_X) = 1,65 \cdot 0,030 \text{ В} \cong 0,05 \text{ В}$$

Д9.12. Полный результат измерения. Измеренное отклонение показаний портативного цифрового мультиметра при 100 В составляет $(0,10 \pm 0,05)$ В.

² Широко распространенный метод для представления характеристик точности средств измерений в перечне технических данных или в руководстве по применению состоит в том, что границы характеристики указываются на основании "настройки". Для калибратора эти данные были бы $\pm (0,01\% \cdot \text{настройки} + 1 \text{ мВ})$. Даже если такой метод рассматривается эквивалентным по сравнению с указанными выше данными, здесь он не применяется, так как он в большинстве случаев может ввести в заблуждение и не представляет выражение физических величин в соответствии с признанной на международном уровне системой обозначений.

Указанная расширенная неопределенность измерения получена умножением стандартной неопределенности измерения на коэффициент охвата $k = 1,65$. Она соответствует предполагаемому прямоугольному распределению с вероятностью охвата приблизительно 95%.

Д9.13. Дополнительные комментарии: Метод, используемый для вычисления коэффициента охвата, тесно связан с тем фактом, что в неопределенности измерения, связанной с результатом измерения, доминирует вклад из-за конечной разрешающей способности ПЦМ. Это будет справедливо при калибровке всех показывающих цифровых приборов с низкой разрешающей способностью при условии, что конечная разрешающая способность – единственный доминирующий источник в бюджете неопределенности.

Д9.14. Математическое примечание. Если ситуация измерения такова, что один из вкладов в неопределенность в бюджете может быть идентифицирован как доминирующий, например, вклад с индексом 1, то стандартная неопределенность, связанная с результатом измерения y , может быть записана как

$$u(y) = \sqrt{u_1^2(y) + u_R^2(y)} \quad (\text{Д9.2})$$

Здесь

$$u_R(y) = \sqrt{\sum_{i=2}^N u_i^2(y)} \quad (\text{Д9.3})$$

обозначает общий вклад в неопределенность не доминирующих источников. Пока отношение общего вклада в неопределенность $u_R(y)$ не доминирующих источников к доминирующему вкладу в неопределенность $u_1(y)$ не больше, чем 0,3, формула (Д9.2) может быть аппроксимирована как:

$$u(y) \cong u_1(y) \cdot \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{u_R(y)}{u_1(y)} \right)^2 \right] \quad (\text{Д9.4})$$

Относительная ошибка аппроксимации меньше, чем $1 \cdot 10^3$. Из-за коэффициента, заключенного в скобки в формуле (Д9.4) максимальное относительное изменение стандартной неопределенности составляет не больше, чем 5%. Это значение находится внутри принятого интервала для математического округления неопределенности измерения.

Согласно этим предположениям, распределение значений, которое могло бы быть приемлемо приписано измеряемой величине, является по существу идентичным с распределением известного доминирующего вклада. Из известной плотности распределения $\varphi(y)$ может быть определена вероятность охвата p для любого значения расширенной неопределенности измерения U , используя интегральное соотношение:

$$p(U) = \int_{y-U}^{y+U} \varphi(y') dy' \quad (\text{Д9.5})$$

Обратное выражение от этого соотношения приводит к расширенной неопределенности измерения, как функции от вероятности охвата $U = U(p)$ для данной плотности

распределения $\varphi(y)$. Используя эту связь, коэффициент охвата может быть окончательно выражен как:

$$k(p) = \frac{U(p)}{u(y)} \quad (\text{Д9.6})$$

В случае портативного цифрового мультиметра доминирующий вклад в неопределенность, из-за конечной разрешающей способности индикации, составляет $u_{\delta V_X}(E_X) = 0,029 \text{ В}$, в то время как общий вклад в неопределенность не доминирующих источников составляет $u_R(E_X) = 0,0064 \text{ В}$. Соответствующее отношение будет $u_R(E_X)/u_{\delta V_X}(E_X) = 0,22$. Таким образом, результирующее распределение значений, которое приемлемо может быть приписано отклонению показаний, по существу является прямоугольным. Вероятность охвата для прямоугольного распределения линейно связана с расширенной неопределенностью измерения соотношением (a – половина ширины интервала прямоугольного распределения):

$$p = \frac{U}{a}$$

(Д9.7)

Решение этого уравнения относительно расширенной неопределенности измерения U и подстановка результата вместе с выражением стандартной неопределенности измерения для прямоугольного распределения согласно выражения (3.8) EAL-R2 окончательно дает соотношение:

$$k(p) = p\sqrt{3} \quad (\text{Д9.8})$$

Таким образом, для вероятности охвата $p = 95\%$, используемой в EA, соответствующий коэффициент охвата составляет $k = 1,65$.

Д10. КАЛИБРОВКА ШТАНГЕНЦИРКУЛЯ

Д10.1. Стальной штангенциркуль калибруется с применением стальных концевых мер 1-го класса, которые служат в качестве рабочего эталона. Диапазон измерения штангенциркуля составляет от 0 до 150 мм. Разрешение составляет 0,05 мм (значение цены деления основной шкалы составляет 1 мм, значение цены деления нониуса – 1/20 мм). При калибровке используются несколько концевых мер с номинальными длинами в диапазоне 0,5–

150 мм. Они выбираются таким образом, чтобы точки измерения лежали приблизительно на равном расстоянии друг от друга (например, 0 мм, 50 мм, 100 мм, 150 мм), но составляли различные значения шкалы нониуса (например, 0,0 мм, 0,3 мм, 0,6 мм, 0,9 мм).

В примере рассматривается калибровка точка 150 мм для измерения наружных размеров. Перед калибровкой многократно контролировалось состояние штангенциркуля. Этот контроль касался зависимости результата измерения от расстояния объекта измерения до направляющей штангенциркуля (ошибки Аббе), качества измерительных поверхностей пяток штангенциркуля (плоскостность, параллельность, перпендикулярность) и функционирования механизмов крепления.

Д10.2. Отклонение показания E_X штангенциркуля при заданной температуре $t_0 = 20^\circ \text{ С}$ получается из зависимости:

$$E_X = l_{iX} - l_S + L_S \cdot \bar{\alpha} \cdot \Delta t + \delta l_{iX} + \delta l_M \quad (\text{Д10.1})$$

где

l_{iX} – показания штангенциркуля;

l_S – длина используемой концевой меры;

L_S – номинальное значение используемой концевой меры;

$\bar{\alpha}$ – средний коэффициент теплового расширения материалов штангенциркуля и концевой меры;

Δt – разница температур между штангенциркулем и концевой мерой;

δl_{iX} – поправка на конечное разрешение штангенциркуля;

δl_M – поправка на механические эффекты, такие как существующее измерительное усилие, ошибки Аббе, отклонения от плоскостности и параллельности измерительных поверхностей.

Д10.3. Рабочие эталоны (l_S , L_S): Длины используемых в качестве рабочих эталонов концевых мер длины вместе с соответствующими расширенными неопределенностями указываются в свидетельстве калибровки. Это свидетельство подтверждает, что концевые меры длины соответствуют требованиям на концевые меры длины 1-го класса согласно DIN EN ISO 3650, т.е. что средняя длина концевой меры соответствует номинальной длине в пределах $\pm 0,08$ мм. Номинальная длина концевой меры применяется без поправки к ее действительной длине, причем предельные границы принимаются как верхняя и нижняя границы области изменчивости.

Д10.4. Температура (Δt и $\bar{\alpha}$): Через время, достаточное для стабилизации, температура штангенциркуля и концевых мер длины должна находиться в пределах $\pm 2^\circ \text{C}$. Средний коэффициент теплового расширения принимается равным $11,5 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ (неопределенность среднего теплового коэффициента расширения и разности тепловых коэффициентов расширения не принята во внимание; их влиянием в этом случае можно пренебречь. См. EAL-R2-S1, пример S4).

Д10.5. Разрешение штангенциркуля (δl_{iX}): Цена деления шкалы нониуса составляет 0,05 мм. Поэтому предполагается, что вариация считываемых значений из-за конечного разрешения подчиняется прямоугольному распределению с полушириной интервала ± 25 мкм.

Д10.6. Механические эффекты (δl_M): Эти эффекты включают применяемое измерительное усилие, ошибки Аббе и зазор между направляющей и движущейся измерительной пяткой. Дополнительные эффекты могут возникать, когда измерительные поверхности пяток не достаточно плоские, не параллельны друг другу и не перпендикулярны к направляющим. Минимизировать затраты можно, приняв во внимание только общую область возможных отклонений, лежащую в интервале ± 50 мкм.

Д10.7. Корреляция: входные величины рассматриваются как некоррелированные.

Д10.8. Измерения (l_{iX}): Измерения повторялись многократно без определения

разброса наблюдений. Следовательно, неопределенность из-за ограниченного числа повторных наблюдений, не вносит вклада. Результат измерения для 150-миллиметровой концевой меры длины составил 150,10 мм.

Д10.9. Бюджет неопределенности (E_X):

Величина X_i	Оценка x_i	Стандартная неопределенность $u(x_i)$	Распределение	Коэффициент чувствительности c_i	Вклад в неопределенность $u_i(y)$
l_{iX}	150,10 мм	-	-	-	-
l_S	150,00 мм	0,46 мкм	прямоугольный	-1,0	-0,46 мкм
Δt	0	1,15 К	прямоугольный	1,7 мкм К ⁻¹	2,0 мкм
δl_{iX}	0	15 мкм	прямоугольный	1,0	15 мкм
δl_M	0	29 мкм	прямоугольный	1,0	29 мкм
E_X	0,10 мм				33 мкм

Д10.10. Расширенная неопределенность: При оценке неопределенности результата явно доминируют вклады от измерительного усилия и конечного разрешения шкалы нониуса. Окончательное распределение не является нормальным, а скорее трапециевидным с отношением полуширины меньшего основания к полуширине большего основания равным $\beta = 0,33$. Поэтому метод определения эффективных степеней свободы, описанный в приложении к DKD-3 (англ. ЕА-4/02), не пригоден. Коэффициент охвата, соответствующий этому трапециевидному распределению, $k = 1,83$ получается из выражения (S10.10) главы S10.13 (математические ссылки). Поэтому

$$U = k \cdot u(E_X) = 1,83 \cdot 0,033 \text{ мм} \cong 0,06 \text{ мм}$$

Д10.11. Полный результат измерения:

В калибруемой точке 150 мм измеренное отклонение показаний штангенциркуля составило $(0,10 \pm 0,06)$ мм.

Указанная расширенная неопределенность измерения получена умножением стандартной неопределенности измерения на коэффициент охвата $k = 1,83$. Она соответствует предполагаемому трапециевидному распределению с вероятностью охвата приблизительно 95%.

Д10.12. Дополнительные комментарии: Используемый метод для оценки коэффициента охвата связан с тем фактом, что в неопределенности измерения, связанной с результатом, доминируют два источника: механические эффекты и конечное разрешение шкалы нониуса.

Поэтому необоснованно предполагать нормальное распределение выходной величины и применять условия EAL-R2, раздел 5.6. Учитывая, что на практике вероятность и плотность вероятности может определяться только с точностью от 3% до 5%, распределение, по существу будет трапециевидным; оно получается через свертку двух доминирующих вкладов, подчиненных прямоугольному распределению. Полуширина основания и вершины полученной симметричной трапеции составит 75 мкм и 25 мкм

соответственно; в этом случае приблизительно 95% площади трапеции будет содержаться в интервале ± 60 мкм от ее оси симметрии, что соответствует коэффициенту охвата $k = 1,83$.

Д10.13. Математическое примечание: Если измерительная ситуация такова, что два вклада в неопределенность в бюджете можно идентифицировать как доминирующие, то приемлемо использовать метод, представленный в разделе Д9.14, когда оба доминирующих вклада – например, вклады в неопределенность с индексами 1 и 2 – суммированы в общий вклад. Стандартная неопределенность для измеряемой величины y может быть в этом случае записана в форме

$$u(y) = \sqrt{u_0^2(y) + u_R^2(y)} \quad (\text{Д10.2})$$

где

$$u_0(y) = \sqrt{u_1^2(y) + u_2^2(y)} \quad (\text{Д10.3})$$

указывает на общий вклад двух доминирующих источников, а общий вклад в неопределенность оставшихся не доминирующих источников запишется как

$$u_R(y) = \sqrt{\sum_{i=3}^N u_i^2(y)} \quad (\text{Д10.4})$$

Когда оба доминирующих вклада описываются прямоугольными распределениями с полуширинами интервалов a_1 и a_2 , результатом их свертки является симметричное трапецеидальное распределение с полушириной основания и вершины соответственно (смотри пример на рисунке 1)

$$a = a_1 + a_2 \text{ и } b = |a_1 - a_2| \quad (\text{Д10.5})$$

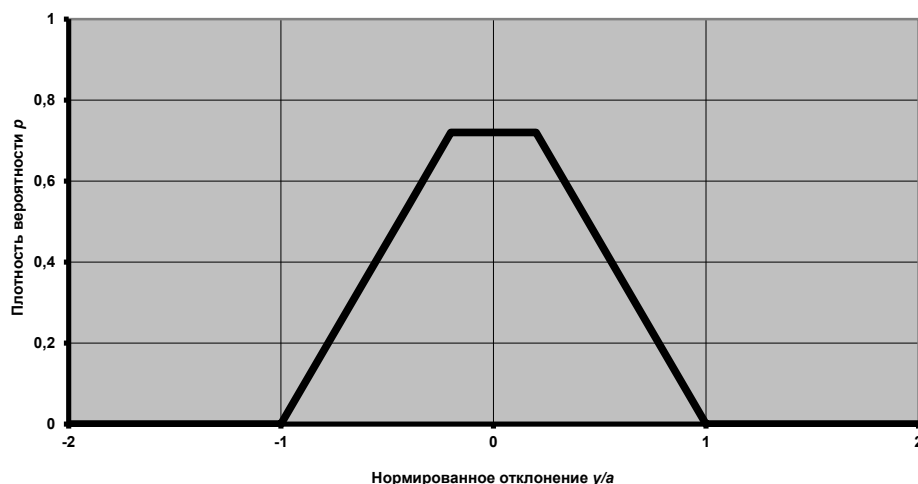


Рисунок 1: Унифицированная симметричная трапецеидальная плотность распределения вероятностей со значением параметра точки перегиба $\beta = 0,33$, являющаяся результатом свертки двух прямоугольных распределений.

Распределение можно выразить в общей форме

$$\varphi(y) = \frac{1}{a(1+\beta)} \cdot \begin{cases} 1 & |y| < \beta \cdot a \\ \frac{1}{1-\beta} \left(1 - \frac{|y|}{a}\right) & \beta \cdot a \leq |y| \leq a \\ 0 & a < |y| \end{cases} \quad (\text{Д10.6})$$

Соотношение длин основания и вершины трапеции обозначается через параметр точки перегиба и выражается:

$$\beta = \frac{b}{a} = \frac{|a_1 - a_2|}{a_1 + a_2} \quad (\text{Д10.7})$$

Квадрат стандартной неопределенности измерения, определенный из трапецеидального распределения используя формулу (Д10.6), (т.е. дисперсия) есть

$$u^2(y) = \frac{a^2}{6} (1 + \beta^2) \quad (\text{Д10.8})$$

Используя распределение из выражения (Д10.6) была выведена зависимость коэффициента охвата от вероятности охвата в соответствии с методом, описанным в разделе Д9.14.

$$k(p) = \frac{1}{\sqrt{\frac{1+\beta^2}{6}}} \cdot \begin{cases} \frac{p(1+\beta)}{2} & \frac{p}{2-p} < \beta \\ 1 - \sqrt{(1-p)(1-\beta^2)} & \beta \leq \frac{p}{2-p} \end{cases} \quad (\text{Д10.9})$$

Рисунок 2 изображает зависимость коэффициента охвата k для вероятности охвата 95% от значения параметра точки перегиба β .

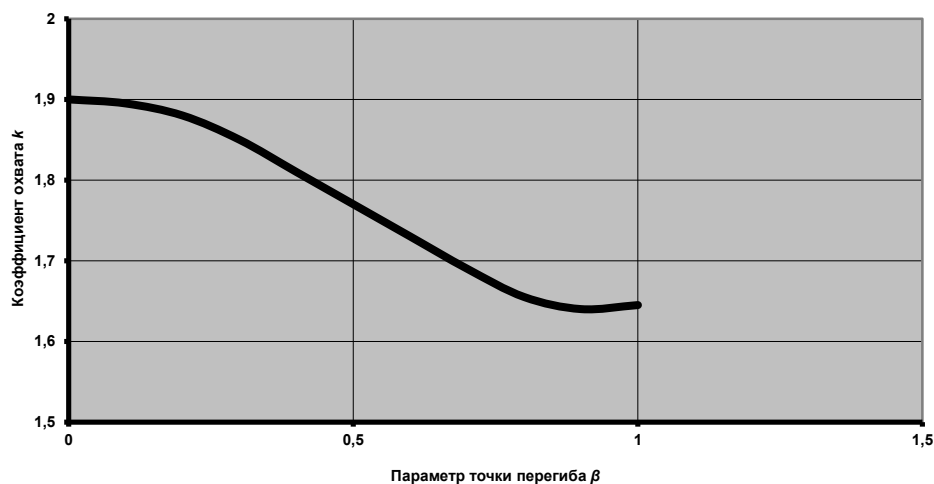


Рисунок 2: Зависимость коэффициента охвата k от параметра точки перегиба β трапецеидального распределения для вероятности охвата 95%.

Коэффициент охвата для вероятности охвата 95%, соответствующей трапецеидальному распределению с параметром точки перегиба $\beta = 0,33$, определяется из соотношения

$$k = \frac{1 - \sqrt{(1 - p)(1 - \beta^2)}}{\sqrt{\frac{1 + \beta^2}{6}}} \quad (D10.10)$$

Д11. КАЛИБРОВКА КАЛИБРАТОРА ТЕМПЕРАТУР ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ 180°C³

Д11.1. Частью процедуры калибровки является измерение температуры, которая должна установиться в измерительном отверстии калибратора температур. Это происходит после стабилизации показаний встроенного индикатора температуры на 180°C. Температура калибруемого отверстия определяется через встроенный платиновый термометр сопротивления, который служит в качестве рабочего эталона, посредством измерения электрического сопротивления термометра через мост переменного тока для измерения сопротивления. Температура t_X , которая должна идентифицироваться как температура измерительного отверстия, когда показания встроенного индикатора температуры составят 180°C, будет определяться как:

$$t_X = t_S + \delta t_S + \delta t_D - \delta t_{iX} + \delta t_R + \delta t_A + \delta t_H + \delta t_V \quad (\text{Д11.1})$$

где

t_S – температура рабочего эталона, воспроизводимая мостом переменного тока для измерения сопротивления;

δt_S – температурная поправка из-за моста переменного тока для измерения сопротивления;

δt_D – температурная поправка из-за дрейфа значения рабочего эталона с момента его последней калибровки;

δt_{iX} – температурная поправка из-за конечного разрешения показаний калибратора температур;

δt_R – температурная поправка из-за разницы температур между отдельными измерительными отверстиями;

δt_A – температурная поправка из-за осевой температурной неоднородности в измерительном отверстии;

δt_H – температурная поправка из-за гистерезиса при увеличении или понижении ветви измерительного цикла;

δt_V – температурная поправка из-за колебаний температуры в течение времени измерения.

Температурная поправка из-за теплопроводности не принимается во внимание, так как в качестве рабочего эталона используется платиновый термометр сопротивления с наружным диаметром $d \leq 6$ мм. Предыдущие исследования показали, что тепловыми эффектами в данном случае можно пренебречь.

Д11.2. Рабочий эталон (t_S): В свидетельстве калибровки на термометр сопротивления, используемый в качестве рабочего эталона, приведено соотношение между сопротивлением и температурой. Измеренное значение сопротивления соответствует температуре 180,10°C с приписанной расширенной неопределенностью измерения $U = 30$ мК (коэффициент охвата $k = 2$).

Д11.3. Определение температуры через мост переменного тока для измерения сопротивления (δt_S): Температура, определенная термометром сопротивления,

³ Аналогичный пример можно найти в EA-Директиве EA-10/13 "Руководство по калибровке калибратора температур". В данном документе все представлено в упрощенном виде, чтобы подчеркнуть, как установить значение показаний прибора при методе калибровки. Этот метод является основополагающим при калибровке в различных областях измерений и поэтому представляет общий интерес. Кроме того, пример показывает, что существует два эквивалентных способа решения этой проблемы: прямое задание значения показаний прибора и установление поправки на показания, обычно называемой измеренным отклонением показаний.

используемым в качестве рабочего эталона, составила $180,10^{\circ}\text{C}$. Стандартная неопределенность измерения мостом переменного тока в пересчете на температуру составила $u(\delta t_S) = 10 \text{ мК}$.

Д11.4. Температурный дрейф рабочего эталона (δt_D): На основании общих опытов с платиновыми термометрами сопротивления данного типа, используемыми в качестве рабочих эталонов, изменение температуры из-за старения сопротивления с момента последней калибровки эталона оценивается в пределах $\pm 40 \text{ мК}$.

Д11.5. Настройка калибратора температур (δt_{iX}): Встроенный термометр калибратора температур (контрольный термометр) имеет цену деления $0,1 \text{ К}$. Это дает границы температуры $\pm 50 \text{ мК}$, внутри которых можно однозначно установить термодинамическое состояние температурного блока.

Примечание: Если показания встроенного индикатора температуры не приведены в единицах измерения температуры, проводится перерасчет допустимых границ в соответствующие значения температуры. Для этого полученные значения показаний умножаются на постоянную измерительного прибора.

Д11.6. Радиальная температурная неоднородность (δt_R): Радиальная разница температур между различными измерительными отверстиями оценивается в $\pm 100 \text{ мК}$.

Д11.7. Осевая температурная неоднородность (δt_A): Температурное отклонение из-за осевой температурной неоднородности в измерительном отверстии определяется по считываемым значениям при различной глубины погружения и составляет $\pm 250 \text{ мК}$.

Д11.8. Эффект гистерезиса (δt_H): Из-за считывания показаний с эталонного термометра в течение измерительного цикла при повышении и понижении температуры, отклонение температуры измерительного отверстия по причине эффекта гистерезиса оценивается в диапазоне $\pm 50 \text{ мК}$.

Д11.9. Нестабильность температуры (δt_V): Температурные изменения из-за нестабильности температуры в течение измерительного цикла, равного 30 минутам, были оценены в интервале $\pm 30 \text{ мК}$.

Д11.10. Корреляция: Входные величины рассматриваются как некоррелированные.

Д11.11. Повторные наблюдения: Из-за конечного разрешения показаний встроенного термометра разброс показываемых значений не наблюдался и не принимался во внимание.

Д11.12. Бюджет неопределенности измерения (t_x):

Величина	Оценка	Стандартная неопределенность	Распределение	Коэффициент чувствительности	Вклад в неопределенность
X_i	x_i	$u(x_i)$		c_i	$u_i(y)$
t_S	$180,1^{\circ}\text{C}$	15 мК	нормальное	1,0	15 мК
δt_S	$0,0^{\circ}\text{C}$	10 мК	нормальное	1,0	10 мК
δt_D	$0,0^{\circ}\text{C}$	23 мК	прямоугольное	1,0	23 мК
δt_{iX}	$0,0^{\circ}\text{C}$	29 мК	прямоугольное	- 1,0	- 29 мК
δt_R	$0,0^{\circ}\text{C}$	58 мК	прямоугольное	1,0	58 мК
δt_A	$0,0^{\circ}\text{C}$	144 мК	прямоугольное	1,0	144 мК
δt_H	$0,0^{\circ}\text{C}$	29 мК	прямоугольное	1,0	29 мК

δt_V	0,0°C	17 мК	прямоугольное	1,0	17 мК
t_X	180,1°C				164 мК

Д11.13. Расширенная неопределенность: В стандартной неопределенности результата явно доминируют составляющие от эффекта неизвестной температурной поправки из-за осевой температурной неоднородности в измерительном отверстии и радиальной разницы температур между измерительными отверстиями. Результирующее распределение не является нормальным, а по существу трапецеидальным. Согласно Д10.13 коэффициент охвата, соответствующий параметру точки перегиба $\beta = 0,43$, равен $k = 1,81$.

$$U = k \cdot u(t_X) = 1,81 \cdot 164 \text{ мК} \cong 0,3 \text{ К}$$

Д11.14. Полный результат измерения: Температура измерительного отверстия, при заданных показаниях встроенного контрольного термометра 180,0°C, составила 180,1°C ± 0,3°C.

Приведенная расширенная неопределенность измерения получена умножением стандартной неопределенности измерения на коэффициент охвата $k = 1,81$. Она соответствует предполагаемому трапецеидальному распределению с вероятностью охвата приблизительно 95%.

Д11.15. Математические примечания касательно модели: Для большинства метрологов будет необычным, чтобы показания контрольного термометра не были явно отражены в функциональной модели согласно формуле (Д11.1). Подходя с такой точки зрения к измерительной задаче, опишем проблему альтернативно через отклонение показаний встроенного индикатора температур

$$E_X = t_X - t_i \quad (\text{Д11.2})$$

$$E_X = t_S - t_i + \delta t_S + \delta t_D - \delta t_{iX} + \delta t_R + \delta t_A + \delta t_H + \delta t_V \quad (\text{Д11.3})$$

При этом значение показаний t_i является номинальным. Такой эффект обусловлен сдвигом шкал измеряемых величин. Он, однако, не вносит вклада в неопределенность измерения, приписываемую отклонению показаний.

$$u(E_X) = u(t_X) \quad (\text{Д11.4})$$

Функциональная модель по формуле (Д11.1) может быть получена из формулы (Д11.3) с использованием определения отклонения показаний по формуле (Д11.2).

Это примечание показывает, что не существует только одного единственно верного способа выбора модели оценки измерений. Выбор модели находится в руках метролога и определяется навыками и его видением проблемы. Функциональные модели, которые математически могут быть преобразована одна в другую, представляют тот же измерительный процесс. В случаях, которые касаются непрерывной шкалы показаний, как при рассмотрении калибровки калибратора температур, все функциональные модели, которые можно трансформировать друг в друга с использованием линейного масштабного преобразования, можно рассматривать как эквивалентное описание существующей проблемы.

Д12. КАЛИБРОВКА БЫТОВОГО СЧЕТЧИКА ВОДЫ

Д12.1. Калибровка счетчика воды включает в себя определение относительного отклонения показаний в пределах допустимой области измерения объемного расхода счетчика. Измерения проводятся на испытательном стенде, который воспроизводит необходимый расход воды с давлением приблизительно 500 кПа, являющимся типичным значением для линий муниципального водоснабжения. Вода собирается в открытой измерительной емкости, которая калибрована и воспроизводит заданный объем воды. На

начало измерений она пуста, однако увлажнена. Измерительная емкость имеет узкогорлый заливной патрубок, на котором расположена шкала, по которой можно устанавливать уровень наполнения. Калибруемый счетчик устанавливается между обеими емкостями и подключается к ним. Он имеет механический отсчет по стрелке. Измерение осуществляется с расходом 2500 ч^{-1} в постоянном режиме старт-стоп, означающем, что расход, как на начало, так и на конец измерения равен нулю. Значения показаний счетчика воды фиксируются в начале и в конце измерений. Фиксируется уровень наполнения измерительной емкости в конце измерения. Также фиксируются температура и давление воды в счетчике и температура воды в измерительной емкости.

Д12.2. Относительное отклонение e_X показаний для единичного прохода определяется как

$$e_X = \frac{\Delta V_{iX} + \delta V_{iX2} - \delta V_{iX1}}{V_X} - 1 \quad (\text{Д12.1})$$

где

$$V_X = (V_{iS} + \delta V_{iS})(1 + \alpha_S(t_S - t_0))(1 + \alpha_W(t_X - t_S))(1 - \kappa_W(p_X - p_S)) \quad (\text{S12.2})$$

причем

$\Delta V_{iX} = V_{iX2} - V_{iX1}$ – разница показаний счетчика;

V_{iX2}, V_{iX1} – показания счетчика в начале и в конце измерения;

$\delta V_{iX2}, \delta V_{iX1}$ – поправка из-за конечного разрешения показаний счетчика;

V_X – объем, пройденный через счетчик в течение измерений при преобладающих условиях, т.е. при давлении p_X и температуре t_X на входе счетчика;

V_{iS} – объем, показываемый в узкогорлом заливном патрубке измерительной емкости в конце измерения;

δV_{iS} – поправка на показываемый объем уровня наполнения измерительной емкости из-за конечного разрешения шкалы;

α_S – температурный коэффициент объемного расширения материала измерительной емкости;

t_S – температура измерительной емкости;

t_0 – значение температуры, при которой проводилась калибровка измерительной емкости;

α_W – температурный коэффициент объемного расширения воды;

t_X – температура воды на входе счетчика;

κ_W – объемная упругость воды;

p_S – давление в измерительной емкости (равно нулю при рассмотрении избыточного давления);

p_X – давление воды на входе счетчика.

Д12.3. Измерительная емкость (V_{iS}, t_0): В свидетельстве калибровки указано, что показания уровня наполнения объема до 200 л при опорной температуре $t_0 = 20^\circ \text{C}$ снимаются с соответствующей относительной расширенной неопределенностью измерения 0,1% ($k = 2$).

Д12.4. Разрешение шкалы измерительной емкости для уровня наполнения (δV_{iS}): Уровень наполнения водой измерительной емкости можно определить с точностью до ± 1 мм. С коэффициентом масштабирования емкости 0,02 л/мм максимальное отклонение объема воды от наблюдаемого показываемого значения оценивается как $\pm 0,02$ л.

Д12.5. Температура воды и измерительной емкости (α_S, t_S): Температура воды в измерительной емкости определяется 15°C в диапазоне ± 2 К. Эти границы покрывают все возможные источники неопределенности, как например калибровка температурного щупа, разрешение при считывании и температурный градиент в емкости. Температурный коэффициент объемного расширения материала емкости (стали), взят из справочника по материалам как константа и равен $\alpha_S = 51 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ в рассматриваемом интервале температур. Так как данное значение указано без неопределенности, то она берется как последний известный значащий разряд этого значения. Поэтому для неизвестных отклонений принимаем, что они лежат внутри приближенных границ $\pm 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

Д12.6. Температура воды в счетчике (α_W, t_X): Температура воды на входе счетчика определяется 16°C с диапазоном ± 2 К. Эти границы покрывают все возможные источники неопределенности, как например калибровка температурного щупа, разрешение при считывании и маленькие температурные изменения в течение одного измерительного эксперимента. Температурный коэффициент объемного расширения воды, взят из справочника по материалам как константа и равен $\alpha_W = 0,15 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ в рассматриваемом интервале температур. Так как данное значение указано без неопределенности, то принимается, что она берется как последний известный значащий разряд этого значения. Поэтому для неизвестных отклонений принимаем, что они лежат внутри приближенных границ $\pm 0,5 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$.

Д12.7. Разница в давлениях воды между счетчиком и емкостью (κ_W, p_S, p_X): Избыточное давление воды на входе счетчика составляет 500 кПа с относительным отклонением не более $\pm 10\%$. На пути от входа счетчика до измерительной емкости вода увеличивается в объеме до избыточного давления 0 кПа (условия атмосферного давления). Сжимаемость воды, взята из справочника по материалам как константа и равна $\kappa_W = 0,46 \cdot 10^{-6} \text{ кПа}^{-1}$ в рассматриваемом интервале температур. Так как данное значение указано без неопределенности, то она берется как последний известный значащий разряд этого значения. Таким образом, для неизвестных отклонений принимаем, что они лежат внутри приближенных границ $\pm 0,005 \cdot 10^{-5} \text{ кПа}^{-1}$.

Д12.8. Корреляция: Входные величины рассматриваются как некоррелированные.

Д12.9. Бюджет неопределенности (V_X):

Величина X_i	Оценка x_i	Стандартная неопределенность	Распределение	Коэффициент чувствительности	Вклад в неопределенность
-------------------	-----------------	---------------------------------	---------------	---------------------------------	-----------------------------

		$u(x_i)$		c_i	$u_i(y)$
V_{iS}	200,02 л	0,10 л	нормальное	1,0	0,10 л
δV_{iS}	0,0 л	0,0115 л	прямоугольное	1,0	0,0115 л
α_S	$51 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$0,29 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	прямоугольное	- 1000 л·К	$- 0,29 \cdot 10^{-3} \text{ л}$
t_S	15°C	1,15 К	прямоугольное	- 0,0198 л·К ⁻¹	- 0,0228 л
α_W	$0,15 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$	$2,9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	прямоугольное	200 л·К	$0,58 \cdot 10^{-3} \text{ л}$
t_X	16°C	1,15 К	прямоугольное	0,0300 л·К ⁻¹	0,03456 л
κ_W	$0,46 \cdot 10^{-6} \text{ кПа}^{-1}$	$2,9 \cdot 10^{-9} \text{ кПа}^{-1}$	прямоугольное	99999,5 л·кПа	$0,29 \cdot 10^{-3} \text{ л}$
p_S	500 кПа	29 кПа	прямоугольное	$92 \cdot 10^{-6} \text{ л} \cdot \text{кПа}^{-1}$	0,0027 л
p_X	0,0 Па	-	-	-	-
V_X	199,95 л				0,109 л

В стандартной неопределенности измерений связанной с результатом явно доминирует вклад из-за показаний уровня наполнения измерительной емкости. Поэтому результирующее распределение не является нормальным, а по существу прямоугольным. Это должно приниматься во внимание при дальнейшей процедуре оценки неопределенности.

Д12.10. Показания счетчика (ΔV_{iX} , δV_{iX1} , δV_{iX2}): Калибруемый счетчик воды имеет разрешение 0,2 л. Поэтому получаем границы $\pm 0,1$ л для максимальных отклонений из-за конечного разрешения для обоих считываний.

Д12.11. Бюджет неопределенности (e_X):

Величина X_i	Оценка x_i	Стандартная неопределенность $u(x_i)$	Распределение	Коэффициент чувствительности c_i	Вклад в неопределенность $u_i(y)$
ΔV_{iX}	200,0 л	-	номинал	-	-
δV_{iX1}	0,0 л	0,058 л	прямоугольное	$- 5,0 \cdot 10^{-3}$	$- 0,29 \cdot 10^{-3} \text{ л}$
δV_{iX2}	0,0 л	0,058 л	прямоугольное	$5,0 \cdot 10^{-3}$	$0,29 \cdot 10^{-3} \text{ л}$
V_X	199,95 л	0,109 л	прямоугольное	$- 5,0 \cdot 10^{-3}$	$- 0,55 \cdot 10^{-3} \text{ л}$
e_X	0,0003	$0,69 \cdot 10^{-3}$			

Д12.12. Повторяемость значений: Относительное отклонение показаний калибруемого счетчика воды при установленном расходе 2500 л/час указывает на большой разброс. По этой причине относительное отклонение показаний определяется трижды. Результаты этих трех определений рассмотрены как независимые наблюдения e_{Xj} в модели для определения среднего отклонения показаний e_{Xav} :

$$e_{Xav} = e_X - \delta e_X \quad (\text{Д12.3})$$

где

e_X – относительное отклонение показаний одного определения,

δe_X – поправка на относительное отклонение показаний, наблюдаемое при различных определениях, из-за плохой повторяемости счетчика.

Д12.13. Измерения (e_X):

Номер	Наблюдаемое относительное отклонение показаний
1	0,0003
2	0,0005
3	0,0022

Среднее арифметическое значение $\bar{e}_X = 0,001$

Эмпирическое стандартное отклонение $s(e_{Xj}) = 0,001$

Стандартная неопределенность измерения $u(\bar{e}_X) = s(\bar{e}_X) = \frac{0,001}{\sqrt{3}} = 0,00060$

Д12.14. Бюджет неопределенности измерения (e_{Xav}):

Величина	Оценка	Стандартная неопределенность	Эффективные степени свободы	Распределение	Коэффициент чувствительности	Вклад в неопределенность
X_i	x_i	$u(x_i)$			c_i	$u_i(y)$
e_X	0,001	$0,60 \cdot 10^{-3}$	2	нормальное	1,0	$0,60 \cdot 10^{-3}$
δe_X	0,0	$0,69 \cdot 10^{-3}$	∞	нормальное	1,0	$0,69 \cdot 10^{-3}$
e_{Xav}	0,001		10			$0,91 \cdot 10^{-3}$

Д12.15. Расширенная неопределенность: Так как эффективные степени свободы стандартной неопределенности измерения, связанной со средним относительным отклонением, малы, стандартный коэффициент охвата должен быть изменен согласно таблице E1:

$$U = k \cdot u(e_{Xav}) = 2,28 \cdot 0,91 \cdot 10^{-3} \cong 2 \cdot 10^{-3}$$

Д12.16. Полный результат измерения: Среднее относительное отклонение показаний счетчика воды, определенное при расходе 2500 л/час, составило $0,001 \pm 0,002$.

Указанная расширенная неопределенность измерения получена умножением стандартной неопределенности измерений с коэффициентом охвата $k = 2,28$. Она соответствует предполагаемому t -распределению с эффективными степенями свободы $\nu_{eff} = 10$ и вероятностью охвата приблизительно 95%.

Д13. КАЛИБРОВКА МЕРЫ ВНУТРЕННЕГО ДИАМЕТРА С НОМИНАЛЬНЫМ ДИАМЕТРОМ 90 ММ

Д13.1. Стальная мера внутреннего диаметра с номинальным внутренним диаметром 90 мм калибруется по методу, приведенному в EA-10/06 (ранее EAL-G29). Применяется компаратор длины типа Аббе и стальное установочное кольцо, чей номинальный внутренний диаметр $D_S = 40$ мм значительно отличается от диаметра меры. В этом случае компаратор длины и стальное установочное кольцо играют роль рабочих эталонов. Кольца поочередно осторожно закрепляются на столе с четырьмя степенями свободы, который включает в себя все элементы позиционирования для выравнивания контролируемого изделия. Кольца контактируют в нескольких противоположно расположенных друг от друга точках с рычагами С-формы, которые соответствующе закреплены на устойчивом измерительном шпинделе. Рычаги С-формы снабжены сферическими контактными наконечниками. Измерительное усилие создается натяжным грузом, который обеспечивает во всей области измерений постоянное усилие с номинальным значением 1,5 Н. Измерительный шпиндель жестко соединен с измерительной головкой стальной масштабной линейки с разрешением 0,1 мкм. Деления штриховой шкалы компаратора периодически контролируются, для того, чтобы подтвердить значения границ отклонений, установленных производителем (МРЕ, максимально допускаемая ошибка).

Контролируется температура окружающей среды, для обеспечения заданных условий окружающей среды для метода калибровки. В рабочем пространстве компаратора соблюдалась температура в диапазоне $\pm 0,5$ К от 20°C. Обратите внимание, что кольца и штриховая шкала в течение всей калибровки сохраняют наблюдаемую температуру.

Д13.2. Диаметр d_x меры внутреннего диаметра при заданной температуре $t_0 = 20^\circ\text{C}$ определяется следующим способом:

$$d_x = d_S + \Delta l + \delta l_i + \delta l_T + \delta l_P + \delta l_E + \delta l_A \quad (\text{Д13.1})$$

где

d_S – диаметр образцового установочного кольца при заданной температуре;

Δl – наблюдаемая разница в перемещении измерительного шпинделя, когда контактный наконечник касается внутренней поверхности кольца в двух противоположно расположенных друг от друга точках;

δl_i – поправка на отклонение показаний компаратора;

δl_T – поправка на температурный эффект калибруемой меры, образцового установочного кольца и штриховой шкалы компаратора;

δl_P – поправка на несоосность щупов по отношению к измерительной линии;

δl_E – поправка на различие в упругой деформации калибруемой меры и образцового установочного кольца;

δl_A – поправка на различие ошибок Аббе компаратора, когда измеряются диаметры калибруемой меры и образцового установочного кольца.

Д13.3. Рабочий эталон (d_S): Внутренний диаметр установочного кольца, используемого в качестве рабочего эталона, приведен в свидетельстве калибровки вместе с

соответствующей расширенной неопределенностью измерения и составляет $40,0007 \text{ мм} \pm 0,2 \text{ мкм}$ (коэффициент охвата $k = 2$).

Д13.4. Компаратор (δl_i): Поправка на отклонение штриховой шкалы определяется производителем и заложено в электронной программе. Все оставшиеся вклады лежат в указанных производителем границах $\pm (0,3 \text{ мкм} + 1,5 \cdot 10^{-6} \cdot l_i)$, где l_i – показываемая длина. Соблюдение установленных значений гарантируется периодическим контролем. Для действительной разницы длин $D_X - D_S = 50 \text{ мм}$ неизвестный остаток вкладов определяется внутри диапазона $\pm 0,375 \text{ мкм}$.

Д13.5. Температурная поправка (δl_T): В течение всего измерения необходимо тщательно следить, чтобы сохранялась заданная температура калибруемой меры, установочного кольца и шкалы компаратора. На основании предыдущих измерений и общего опыта с измерительными системами можно быть уверенным, что отклонение температуры калибруемой меры, установочного кольца и шкалы компаратора от температуры окружающей среды останутся в интервале $\pm 0,2 \text{ К}$. Однако температура окружающей среды в измерительном пространстве определяется в интервале $\pm 0,5 \text{ К}$. Поэтому знание об измерении лучше описать через отклонение температуры окружающей среды от эталонной температуры и отклонения температур калибруемой меры, установочного кольца и шкалы компаратора (линейки) от температуры окружающей среды. Поправка на температурные влияния δl_T определяется по следующей модели:

$$\begin{aligned} \delta l_T = & (D_S(\alpha_S - \alpha_R) - D_X(\alpha_X - \alpha_R))\Delta t_A + \\ & + D_S\alpha_S\delta t_S - D_X\alpha_X\delta t_X - (D_S - D_X)\alpha_R\delta t_R \end{aligned} \quad (\text{Д13.2})$$

где

D_X, D_S – номинальные диаметры калибруемой меры и эталонного установочного кольца;

$\alpha_X, \alpha_S, \alpha_R$ – температурные коэффициенты линейного расширения калибруемой меры, эталонного установочного кольца и штриховой шкалы компаратора;

$\Delta t_A = t_A - t_0$ – отклонение температуры окружающей среды измерительного пространства от заданной температуры $t_0 = 20^\circ \text{ C}$;

$\delta t_X, \delta t_S, \delta t_R$ – отклонения температур калибруемой меры, эталонного установочного кольца и штриховой шкалы компаратора от температуры окружающей среды.

Так как математические ожидания четырех температурных отклонений, входящих в формулу (Д13.2), равны нулю, общепринятый способ линеаризации не включает эффектов, связанных с неопределенностью значений трех температурных коэффициентов линейного расширения. Как представлено в разделе Д4.13, необходимо использовать нелинейный способ, чтобы определить стандартные неопределенности, связанные с четырьмя слагаемыми:

$$\begin{aligned} \delta l_{TA} &= (D_S(\alpha_S - \alpha_R) - D_X(\alpha_X - \alpha_R))\Delta t_A \\ \delta l_{TS} &= D_S\alpha_S\delta t_S \\ \delta l_{TX} &= D_X\alpha_X\delta t_X \\ \delta l_{TR} &= (D_S - D_X)\alpha_R\delta t_R \end{aligned} \quad (\text{Д13.3})$$

На основании свидетельства калибровки для установочного кольца и данных производителя для калибруемой меры и шкалы компаратора получаем, что температурный коэффициент линейного расширения лежит в интервале $(11,5 \pm 1,0) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. По этому значению и границам температурных изменений, приведенных выше, стандартные неопределенности, связанные с четырьмя слагаемыми будут равны $u(\delta l_{TA}) = 0,012 \text{ мкм}$, $u(\delta l_{TS}) = 0,053 \text{ мкм}$, $u(\delta l_{TX}) = 0,12 \text{ мкм}$ и $u(\delta l_{TR}) = 0,066 \text{ мкм}$. По этим значениям определяется стандартная неопределенность, связанная с комбинированной температурной поправкой, при помощи следующего подбюджета неопределенности:

Величина X_i	Оценка x_i	Стандартная неопределенность $u(x_i)$	Распределение	Коэффициент чувствительности c_i	Вклад в неопределенность $u_i(y)$
δl_{TA}	0,0 мкм	0,012 мкм	–	1,0	0,012 мкм
δl_{TS}	0,0 мкм	0,053 мкм	–	1,0	0,053 мкм
δl_{TX}	0,0 мкм	0,12 мкм	–	1,0	0,12 мкм
δl_{TR}	0,0 мкм	0,066 мкм	–	1,0	0,066 мкм
δl_T	0,0 мкм				0,15 мкм

Д13.6. Поправка на несоосность (δl_P): Отклонение от соосности двух сферических щупов и измерительной линии принимается лежащим в пределах $\pm 20 \text{ мкм}$. Используя выражение, представленное в математическом примечании (Д13.13), поправка на возможную несоосность и соответствующая стандартная неопределенность представляется в виде:

$$\delta l_P = 2 \left(\frac{1}{D_X} - \frac{1}{D_S} \right) u^2(\delta c) \quad (\text{Д13.4})$$

$$u^2(\delta l_P) = \frac{16}{5} \left(\frac{1}{D_X^2} + \frac{1}{D_S^2} \right) u^4(\delta c) \quad (\text{Д13.5})$$

Здесь δc есть наименьшее расстояние измерительной хорды от центра кольца. Полученные значения для поправки и соответствующей стандартной неопределенности составят $\delta l_P \cong -0,004 \text{ мкм}$ и $u(\delta l_P) \cong 0,0065 \text{ мкм}$. Как можно увидеть из бюджета неопределенности (Д13.10), это значение на два порядка меньше чем остальные вклады неопределенностей, поэтому его влиянием можно пренебречь при данных условиях измерения.

Д13.7. Поправка на упругую деформацию (δl_E): Упругая деформация калибруемой меры и эталонного установочного кольца во время данных измерений не определяется. Однако на основании предыдущих опытов результирующий эффект от упругой деформации оценивается в пределах $\pm 0,03 \text{ мкм}$.

Д13.8. Поправка на ошибку Аббе (δl_A): Действительное значение ошибки Аббе компаратора не определялось во время данных измерений. Однако на основании опыта и

данных периодического контроля эффекты из-за ошибки Аббе оцениваются в пределах $\pm 0,02$ мкм.

Д13.9. Измерения (Δl): Были получены следующие наблюдения внутреннего диаметра измеряемого и установочного кольца:

№	Объект	Наблюдение	Измеряемая величина
1	Образцовое установочное кольцо	0 на этом этапе показания компаратора устанавливаются на ноль	Диаметр в номинальном направлении плоскости симметрии перпендикулярно к оси цилиндра
2	Калибруемая мера	49,99935 мм	Диаметр в номинальном направлении плоскости симметрии перпендикулярно к оси цилиндра
3	Калибруемая мера	49,99911 мм	Диаметр в плоскости симметрии перпендикулярно к оси цилиндра, повернутый вокруг оси относительно номинального направления на + 1 мм по окружности
4	Калибруемая мера	49,99972 мм	Диаметр в плоскости симметрии перпендикулярно к оси цилиндра, повернутый вокруг оси относительно номинального направления на – 1 мм по окружности
5	Калибруемая мера	49,99954 мм	Диаметр в номинальном направлении, сдвинутом вверх на 1 мм в плоскости параллельной плоскости симметрии перпендикулярной к оси цилиндра
6	Калибруемая мера	49,99996 мм	Диаметр в номинальном направлении, сдвинутом вниз на 1 мм в плоскости параллельной плоскости симметрии перпендикулярной к оси цилиндра

Наблюдения можно разделить на две группы: наблюдения диаметра установочного кольца (наблюдение №1), которые применяются для настройки показаний компаратора на ноль, и наблюдения диаметра калибруемой меры (наблюдения №2-6), которые показывают различие между диаметрами:

Среднее арифметическое значение $\overline{\Delta l} = 49,99954$ мм

Стандартное отклонение единичного наблюдения $s(\Delta l) = 0,33$ мкм

Стандартное отклонение среднего значения $s(\overline{\Delta l}) = \frac{s(\Delta l)}{\sqrt{5}} = 0,15$ мкм

Стандартное отклонение единичного наблюдения $s(\Delta l) = 0,33$ мкм учитывает эффекты из-за отклонения формы калибруемой меры, а также от повторяемости компаратора. Для того, чтобы получить наблюдаемую стандартную неопределенность, связанную с наблюдаемой средней разницей диаметров, также нужно принимать во внимание

неопределенность результатов из-за настройки на ноль показаний компаратора. Она выражается через общее эмпирическое стандартное отклонение $s_p(0) = 0,25$ мкм, которое было определено в предыдущих измерениях при подобных условиях измерения. Результирующая стандартная неопределенность измерения, связанная с наблюдаемой средней разностью, будет равна:

$$u(\Delta l) = \sqrt{s^2(\overline{\Delta l}) + s_p^2(0)} = 0,30 \text{ мкм}$$

Д13.10. Бюджет неопределенности (d_X):

Величина X_i	Оценка x_i	Стандартная неопределенность $u(x_i)$	Распределение	Коэффициент чувствительности c_i	Вклад в неопределенность $u_i(y)$
d_S	40,0007 мм	0,10 мкм	нормальное	1,0	0,10 мкм
Δl	49,99955 мм	0,30 мкм	нормальное	1,0	0,30 мкм
δl_i	0,0 мм	0,22 мкм	прямоугольное	1,0	0,22 мкм
δl_T	0,0 мм	0,15 мкм	нормальное	1,0	0,15 мкм
δl_P	0,000004 мм	0,0065 мкм	прямоугольное	1,0	0,0065 мкм
δl_E	0,0 мм	0,018 мкм	прямоугольное	1,0	0,018 мкм
δl_A	0,0 мм	0,012 мкм	прямоугольное	1,0	0,012 мкм
d_X	90,00025 мм				0,433 мкм

Д13.11. Расширенная неопределенность:

$$U = k \cdot u(d_X) = 2 \cdot 0,414 \text{ мкм} \cong 0,9 \text{ мкм}$$

Д13.12. Полный результат измерения: Диаметр меры внутреннего диаметра составил $(90,0003 \pm 0,0009)$ мм.

Указанная расширенная неопределенность получена умножением стандартной неопределенности измерения на коэффициент охвата $k = 2$. Она соответствует нормальному распределению с вероятностью охвата приблизительно 95%.

Д13.13. Математические примечания по несоосности: Так как невозможно точно сориентировать кольцо по отношению к измерительной оси компаратора, то определяемая при измерении величина есть хорда соответствующего кольца в близи его диаметра. Длина этой хорды d' , наблюдаемая при измерении, связана с диаметром кольца d следующим соотношением:

$$d' = d \cdot \cos(\delta\varphi) \cong d \cdot \left(1 - \frac{1}{2}(\delta\varphi)^2\right) \quad (\text{Д13.6})$$

где $\delta\varphi$ малый угол, который составляет половину центрального угла на хорде минус $\pi/2$. С другой стороны этот угол связан с малым расстоянием δs от хорды до центра кольца выражением:

$$\delta c = \frac{1}{2} \cdot d \cdot \sin(\delta\varphi) \cong \frac{1}{2} \cdot d \cdot \delta\varphi \quad (\text{Д13.7})$$

Следовательно, выражение (Д13.6) можно записать следующим образом:

$$d' \cong d - 2 \frac{(\delta c)^2}{D} \quad (\text{Д13.8})$$

где диаметр кольца d в отношении заменен своим номинальным диаметром D , так как знаменатель в отношении приводит к малой величине. Наилучшая оценка диаметра будет наблюдаться через подстановку среднего значения в последнее выражение:

$$d = d' + 2 \frac{(\delta c)^2}{D} \quad (\text{Д13.9})$$

Здесь принято во внимание, что среднее значение малого расстояния δc равно нулю. Также следует иметь в виду, что значения d , d' и δc в выражениях (Д13.8) и (Д13.9) не идентичны; через эти символы в выражении (Д13.8) представлены не точно известные величины или случайно изменяющиеся, в выражении (Д13.9) символы определяют средние значения этих величин. Так как дисперсия случайной величины равна математическому ожиданию квадрата отклонения случайной величины от ее математического ожидания, квадрат стандартной неопределенности измерения диаметра кольца согласно (Д13.8) будет равен:

$$u^2(d) = u^2(d') + 4 \cdot (\alpha - 1) \frac{u^4(\delta c)}{D^2} \quad (\text{Д13.10})$$

где

$$\alpha = \frac{m_4(\delta c)}{m_2^2(\delta c)} \quad (\text{Д13.11})$$

есть отношение центрального момента четвертого порядка к квадрату центрального момента второго порядка малого расстояния δc . Это отношение зависит от распределения, приписываемого δc . Оно определяет значение $\alpha = 9/5$ при принятии прямоугольного распределения δc , так что в этом случае стандартная неопределенность измерения для диаметра выражается как

$$u^2(d) = u^2(d') + \frac{16}{5} \cdot \frac{u^4(\delta c)}{D^2} \quad (\text{Д13.12})$$