

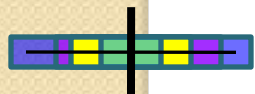
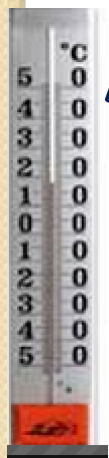
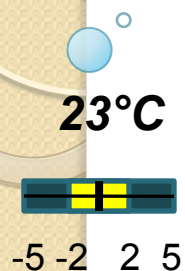
Оценка неопределенности результатов измерений

Ведущий эксперт

Донбаева Вера Алексеевна

Тел. (7172) – 27-09-47

E-mail: donbaeva@mail.ru



Точность

$U(t)$ или Δ

Нестабильность

Экстраполяция

Считывание показаний

Цена деления

Дискретность показаний

Время

Изменение температуры

Оператор

Нагрев

Влажность

Влияние на электронику

Местоположение

Неравномерность распределения

Неопределенность измерений –

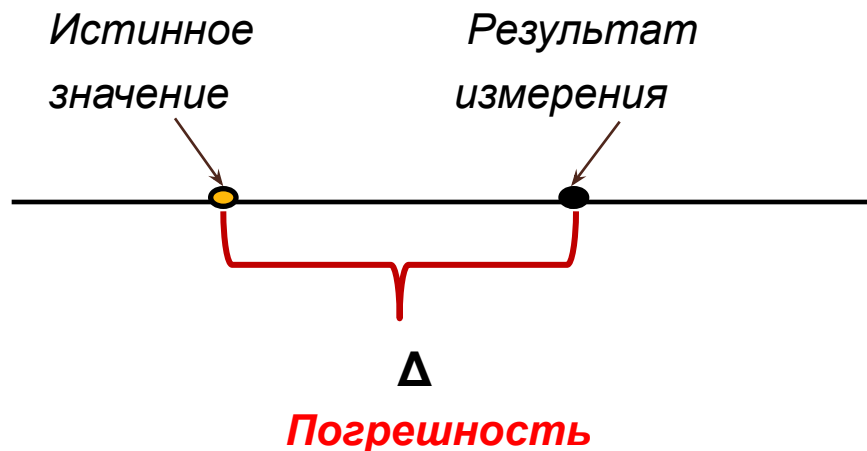
параметр, связанный с результатом измерений и характеризующий рассеяние значений, которые могли бы быть **обоснованно приписаны** измеряемой величине.

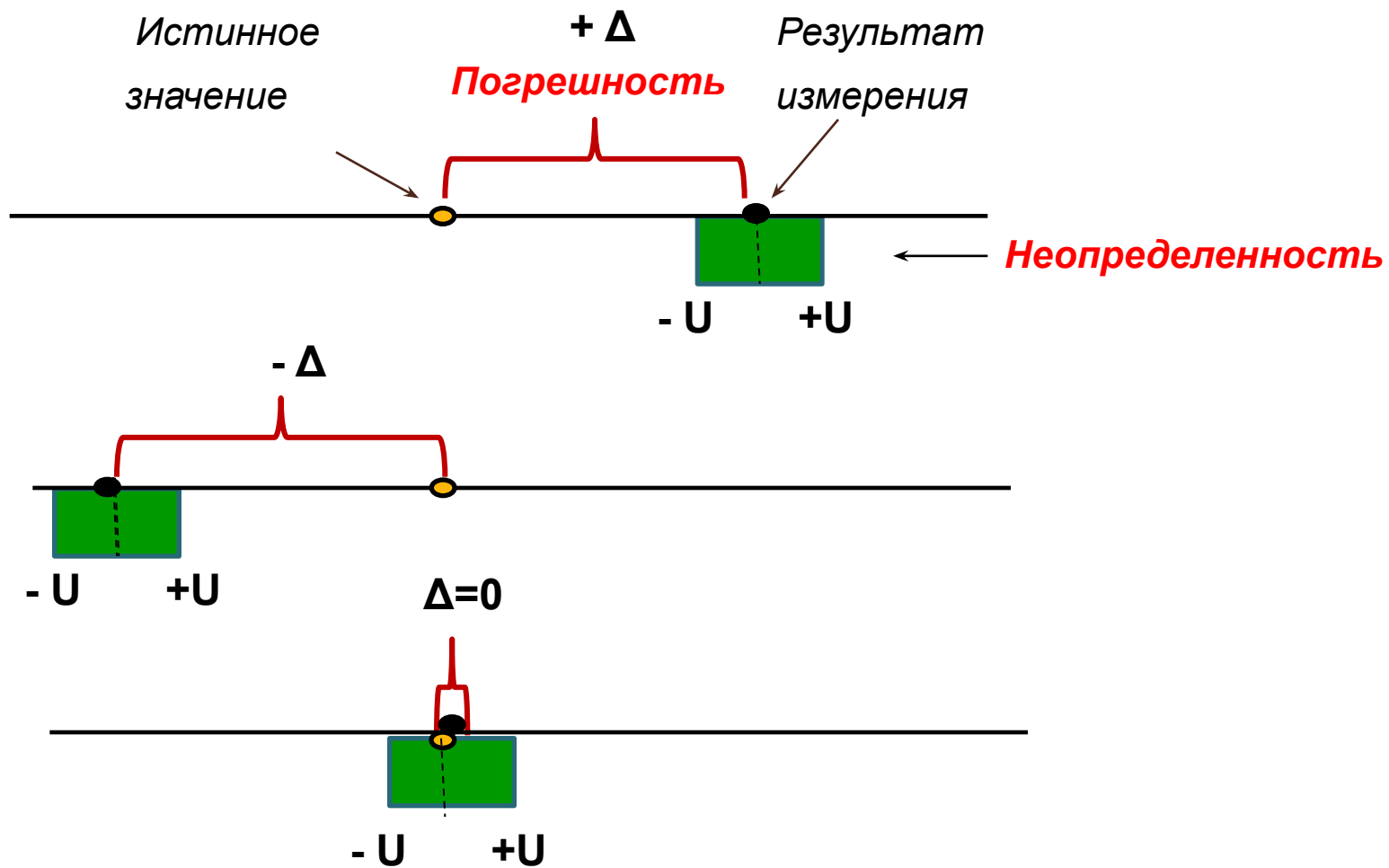
uncertainty

Для оценки **качества результата** измерения опирается на:

- вероятностные характеристики погрешности измерений;
- наблюдаемую (оцененную) изменчивость (рассеянность) результата измерения

Погрешность результата измерения (error of a measurement) – отклонение результата измерения от истинного (действительного) значения измеряемой величины.





«Неопределенность измерения» характеризует **рассеяние множества** возможных значений результатов измерений в рассматриваемой измерительной ситуации, но не погрешность конкретного результата измерения.

Возможен случай, когда результат измерения имеет пренебрежимо малую погрешность при большой неопределенности.



РМГ -29

Неопределенность – неотрицательный параметр, характеризующий рассеяние значений величины, приписываемых измеряемой величине на основании измерительной информации

Концепция неопределенности – причины появления:

Причина 1 – несостоятельность теории погрешностей

- при ее использовании в специальных областях измерения (медицина, аналитическая химия, мониторинг окружающей среды, психология и др.),
- при оценке точности результатов и методик испытаний,
- при проведении фундаментальных исследований в науке и технике,
- при сличениях национальных эталонов, включая эталонные материалы.

Причина 2 (экономического характера) – необходимость указание меры доверия к результату:

- при многих промышленных и коммерческих применениях, а также в области здравоохранения и безопасности;
- в метрологии и сертификации при заявлении о соответствии;
- в науке при проверке предположений выдвинутых теорий

Причина 3 (стандартизация) – отсутствие международного единства по вопросу оценивания точности

- метод оценки выражение неопределенности един во всем мире, результаты измерений, проводимые в разных странах, всем понятны и их можно легко сличить.

Причина 4 – создание новых эталонов,

- оценка точности, используя неопределенность

Оценка
неопределенности
измерений

взаимное признание результатов измерений и калибровок на международном уровне

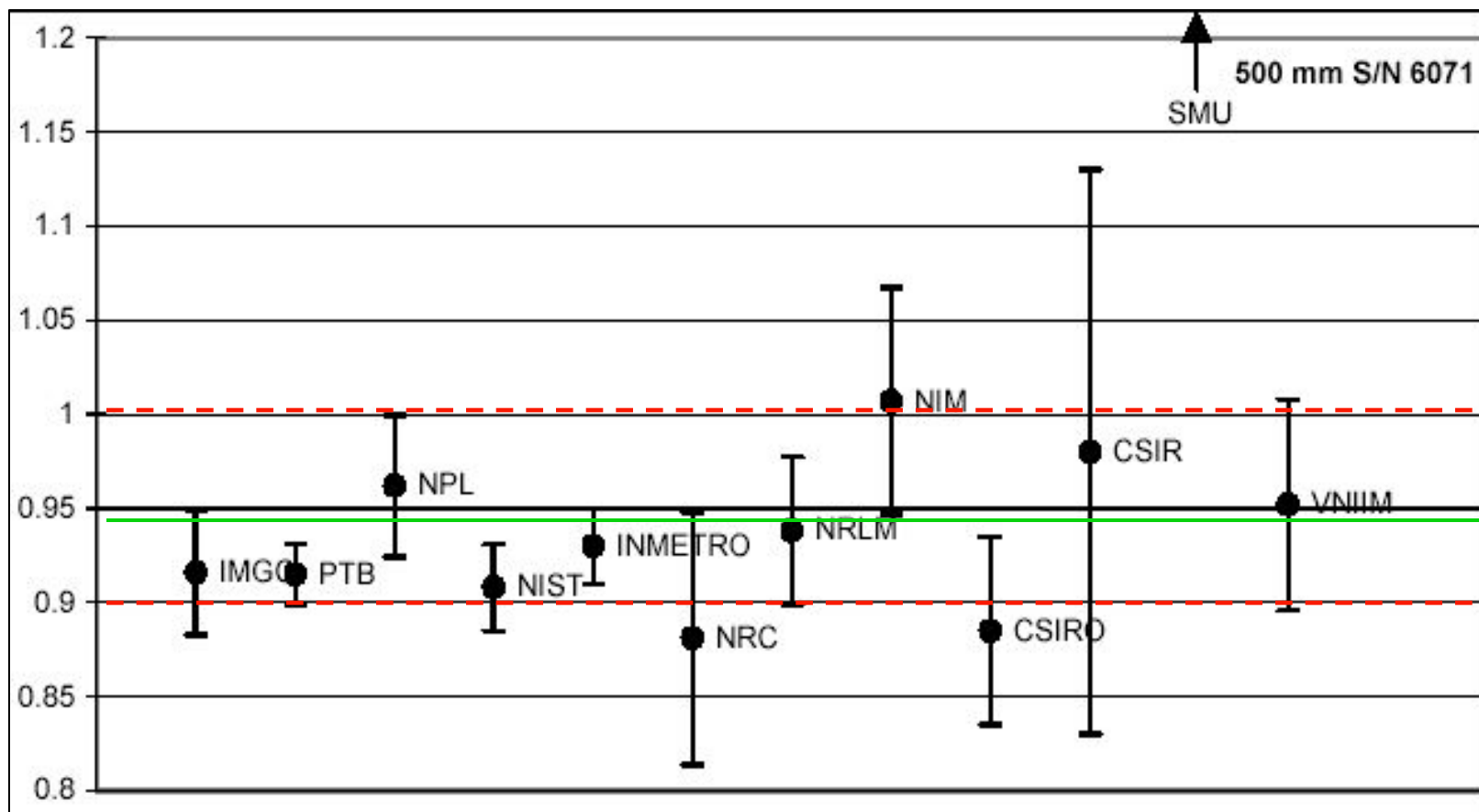
соблюдение требований ИСО/МЭК 17025 при аккредитации лабораторий

связь с государственными эталонами (прослеживаемость измерений)

соответствие международным требованиям при заявлении о качестве продукции

использование как меры доверия в области здравоохранения, безопасности и охраны окружающей среды

Среднее отклонение от номинальной
длины (μм)



Результаты сличений для концевой меры длиной 500 мм, S/N 6071 (по стандартные неопределенности мер)

История создания нормативной базы концепции неопределенности

1978° МКМВ обратился к МБМВ с просьбой рассмотреть проблему стандартизации оценивания качества измерений и совместно с национальными метрологическими лабораториями разработать рекомендацию

1986 Окончательно утверждена Рекомендация. МКМВ поставил перед ИСО задачу разработки подробного Руководства. Ответственность была возложена на Техническую консультативную группу ИСО (TAG 4), в работе которой принимали участие 6 организаций: МЭК, МКМВ, МОЗМ, ИЮПАК, ИЮПАП, МФКХ.

1992 Обнародовано «Руководство по выражению неопределенности в измерениях» (GUM-93).

1999 Приняты следующие документы:

- Соглашение о взаимном признании (**MRA***) национальных эталонов и сертификатов о калибровке и измерениях, выпускаемых национальными метрологическими институтами,
- Стандарт ISO/IEC 17025:1999 «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий

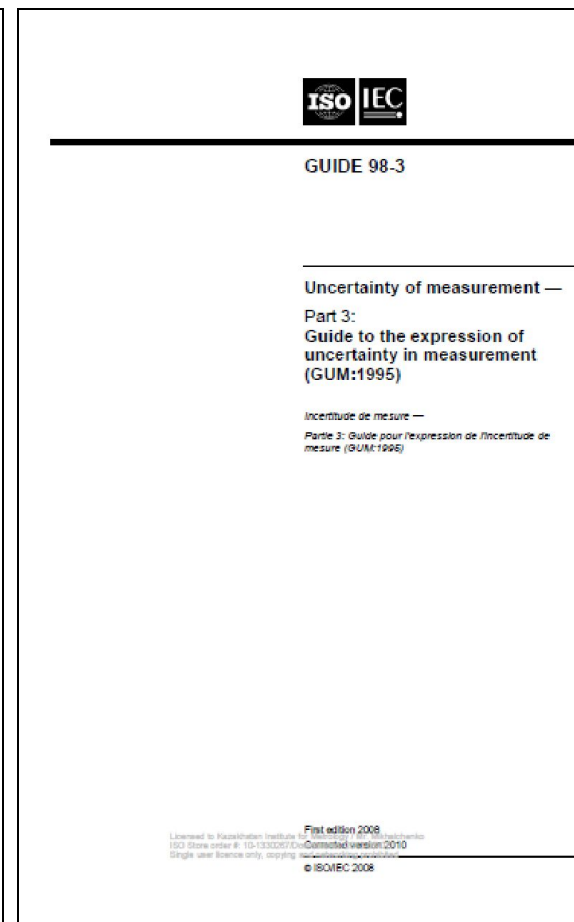
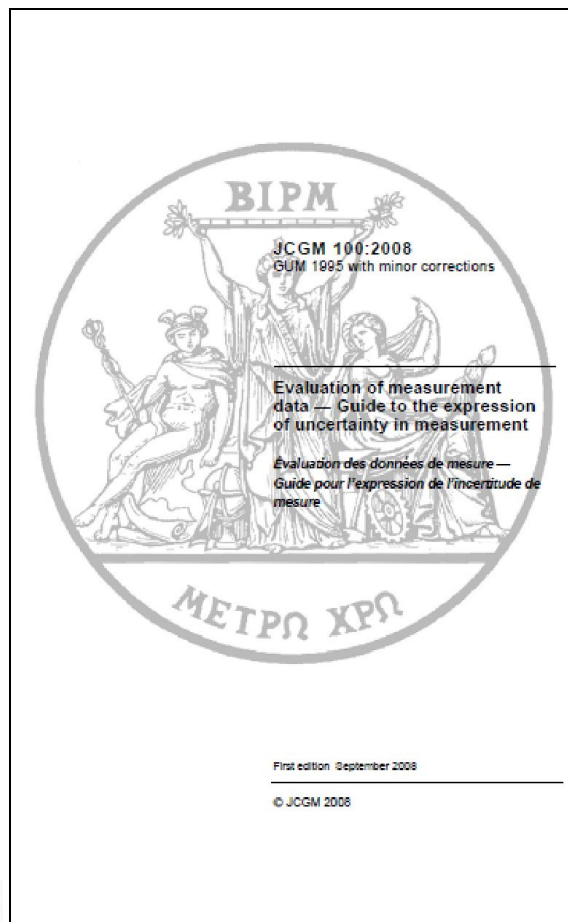
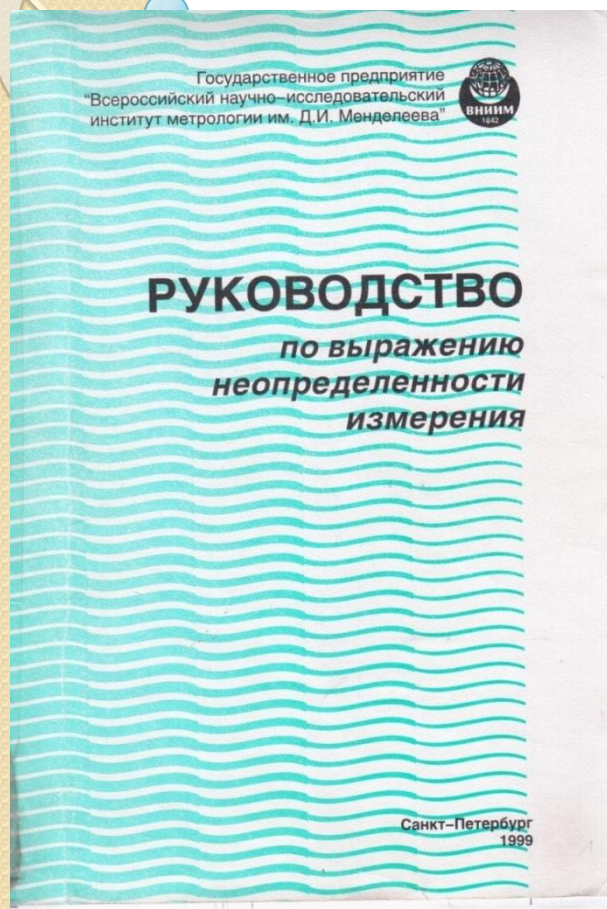
* The Mutual Recognition Arrangement

Наполеон о метрической системе:



«нет ничего более противоречащего складу ума, памяти и соображению, чем то, что предлагают эти ученые. Абстракциям и пустым надеждам принесено в жертву благо теперешних поколений, ибо чтобы заставить старую нацию принять **концепцию неопределенности**, надо переделать все административные правила, все расчеты промышленности. Такая работа устрашает разум».





Руководство по выражению неопределенности измерений GUM-93

EURACHEM / CITAC Guide C

**Quantifying Uncertainty
Analytical Measurements**

Second Edition

QUA

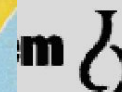
Всероссийский научно-исследовательский институт
метрологии им. Д.И. Менделеева

**Количественное описание
неопределенности
в аналитических
измерениях**

Руководство
ЕВРАХИМ / СИТАК

Второе издание

Санкт-Петербург
2002



EURACHEM / CITAC Guide

**Measurement uncertainty
arising from sampling
due to methods and approaches**

Produced jointly with
EUROLAB, Nordtest and the
Analytical Methods Committee

First Edition 2007



Publication
Reference

EA-4/02

Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration

PURPOSE

The purpose of this document is to harmonise evaluation of uncertainty of measurement within EA, to set up, in addition to the general requirements of EAL-R1, the specific demands in reporting uncertainty of measurement on calibration certificates issued by accredited laboratories and to assist accreditation bodies with a coherent assignment of best measurement capability to calibration laboratories accredited by them. As the rules laid down in this document are in compliance with the recommendations of the Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, published by seven international organisations concerned with standardisation and metrology, the implementation of EA-4/02 will also foster the global acceptance of European results of measurement.

Немецкая калибровочная служба DKD

DKD – 3

Выражение неопределенности измерения при калибровке

Немецкий вариант публикации EAL – R2, редакция 1, апрель 1997
"Выражение неопределенности измерений в калибровке"

Издано Физико-техническим институтом (PTB)
Брауншвайг 1998



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН
Государственная система обеспечения единства измерений Республики Казахстан

ОЦЕНКА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПРИ КАЛИБРОВКЕ/ПОВЕРКЕ
СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЙ

СТ РК 2.184 - 2010

(EA-04/02- 1999, NEQ)

Издание официальное

Комитет технического регулирования и метрологии
Министерства индустрии и новых технологий Республики Казахстан
(Госстандарт)

Астана

И. П. Захаров

НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ЧАЙНИКОВ И... НАЧАЛЬНИКОВ

Учебное пособие

Харьков
2013

Measurement Good Practice Guide

A Beginner's Guide to Uncertainty of Measurement

Stephanie Bell

Начальное руководство по неопределенности измерений

Стефани Белл

Перевод Донбаевой В.А.

Выпуск 2

No. 11

NPL
Национальная
физическая лаборатория

The National Physical Laboratory is operated on behalf of the DTI by NPL Management Limited, a wholly owned subsidiary of Serco Group plc

В основе нового международного подхода к метрологическим характеристикам результатов измерений положен **принцип единообразия** их оценок.

В методе неопределенностей принята точка зрения о том, что все составляющие неопределенности имеют одинаковую природу и должны **оцениваться идентично – через дисперсию**, как меру отклонения от среднего.

Если при случайных эффектах расчет дисперсий для оценки результатов измерений широко известен (на основе статистических рядов наблюдений), то для поправок на систематические эффекты для заимствованных входных величин (эталонов, СО, ССД и др.) оценки неопределенности их значений необходимо также выразить через дисперсию, для этого каким-либо образом нужно **определить (или выбрать) функции распределения вероятностей входящих величин**

Руководство по выражению неопределенности измерений

Содержит единые в международной практике правила выражения неопределенностей и их суммирования для использования службами стандартизации, калибровки средств измерительной техники, аккредитации метрологических служб, измерительных лабораторий.

Цели Руководства:

- обеспечить полную информацию о том, как составлять отчеты о неопределенности,
- предоставить основу для международного сличения результатов измерений.

В эру глобального рынка необходимо, чтобы метод для оценки и выражения неопределенности был **единым** во всем мире, чтобы измерения, проводимые в разных странах, можно было **легко сличить**. И именно такой универсальный метод, применимый ко всем видам измерений и различным уровням точности во многих областях измерений, дает Руководство

Руководство по выражению оценки неопределенности

устанавливает общие правила оценивания и выражения неопределенности измерения:

- в большинстве случаев измеряемая величина Y не является прямо измеряемой, а зависит от ряда других измеряемых величин X_i

$$Y = f(X_1, \dots, X_N)$$

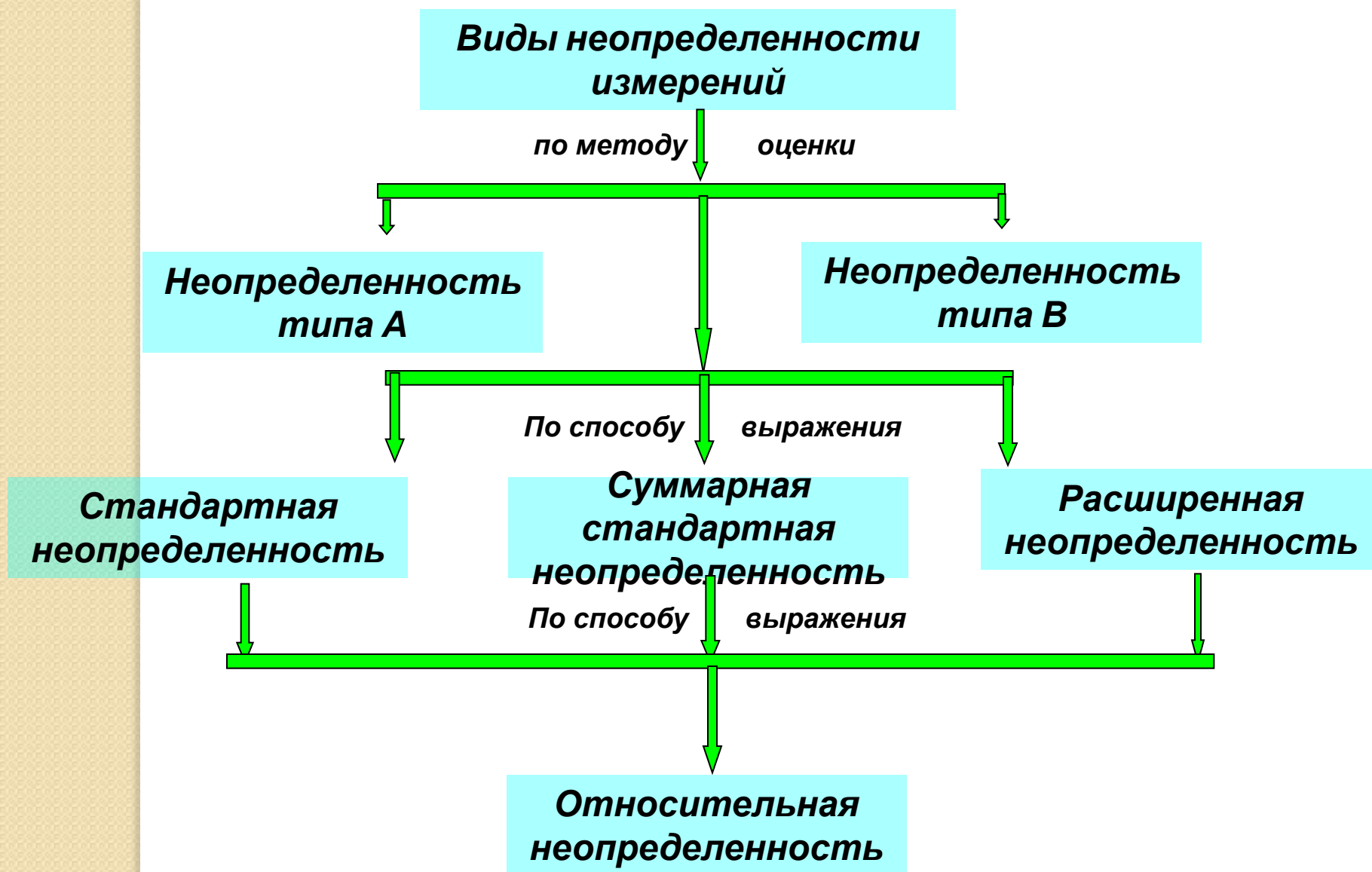
- оценку измеряемой выходной величины Y получают, используя оценку входных величин $x_1, \dots, x_N$

$$y = f(x_1, \dots, x_N)$$

- оцененное стандартное отклонение выходной величины y , называемое **суммарной стандартной неопределенностью** $u_c(y)$, получают из оцененного стандартного отклонения, связанного с каждой входной оценкой x_i , называемого **стандартной неопределенностью** $u_i(x_i)$
- каждую входную оценку x_i и связанную с ней стандартную неопределенность $u_i(x_i)$ получают из распределения возможных значений входных величин x_i (ряды наблюдений или априорное).

Руководство по выражению оценки неопределенности

- оценивание стандартной неопределенности по типу А u_A (статистическая информация);
- оценивание стандартной неопределенности по типу В u_B (априорная информация);
- определение суммарной стандартной неопределенности u_C для случая коррелированных и некоррелированных входных величин;
- определение расширенной неопределенности U (задание коэффициента охвата);
- рекомендации по составлению отчета о неопределенности;
- краткое описание этапов процедуры оценивания и выражения неопределенности;
- основные метрологические, статистические термины и понятия;
- практические рекомендации по оцениванию составляющих неопределенности;
- конкретные примеры оценивания неопределенности измерений.



Классификация неопределенности измерений по методам оценки и способом выражения

Методы оценивания неопределенности

Неопределенность типа A

u_A

Оценивание неопределенности путем статистического анализа рядов наблюдений

Неопределенность типа B

u_B

Оценивание неопределенности иным способом, чем статистический анализ рядов наблюдений

Способы выражения неопределенности

Стандартная неопределенность u — неопределенность результата измерений, выраженная в виде среднего квадратического отклонения

Суммарная стандартная неопределенность u_c — стандартная неопределенность результата измерений, полученного через значения других величин, равная положительному квадратному корню суммы членов, причем члены являются дисперсиями или ковариациями этих других величин, взвешенными в соответствии с тем, как результат измерений изменяется при изменении этих величин.

Расширенная неопределенность U — величина, определяющая интервал вокруг результата измерений, в пределах которого, как можно ожидать, находится большая часть распределения значений, которые с достаточным основанием могли бы быть приписаны измеряемой величине

РМГ - 29

Стандартная неопределенность измерений - неопределенность измерений, выраженная в виде стандартного отклонения

Суммарная стандартная неопределенность измерений – стандартная неопределенность, которую получают, исходя из отдельных стандартных неопределенностей измерений, связанных с входными величинами в модели измерений

Примечание. В случае корреляции входных величин в модели измерений при вычислении суммарной стандартной неопределенности измерений должны также учитываться ковариации

Расширенная неопределенность измерений – произведение суммарной стандартной неопределенности и коэффициента, большего чем число один

Примечание. Коэффициент зависит от вида распределения вероятностей входных величин в модели измерений и выбранной вероятности охвата

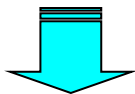
Оценивание составляющих неопределенности

апостериорное

При проведении многократных наблюдений измеряемой величины:

- в условиях повторяемости
- при изменении одного из условий наблюдений таким образом, чтобы получить наблюдаемую изменчивость результатов

В качестве оценки меры рассеянности результатов наблюдений берут **экспериментальное** стандартное отклонение



Неопределенность типа A

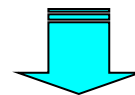
u_A

априорное

Многократные измерения не проводятся

Информация, берется из ранее проведенных измерений, физических свойств измеряемой величины, паспортных данных (сертификатов) на прибор, справочников и т.д..

В качестве оценки меры рассеянности результатов наблюдений берут **оцененное** стандартное отклонение



Неопределенность типа B

u_B

Оценка неопределенности типа A u_A

вычисляют из рядов повторных наблюдений и она является знакомой статистической оценкой дисперсии $s^2 = u^2$

x_1 x_2 $\vdots$ x_n	Наилучшая оценка ожидаемого результата $\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$	$x_1 - \bar{x}$ $x_2 - \bar{x}$ $\vdots$ $x_n - \bar{x}$	$u_A(x) = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}$
-------------------------------------	--	---	---

Для большинства применений рекомендуется, чтобы $k = 2$.

$$v_{eff} = (n-1)(u_c / u_A)^4$$

Однако это значение k может быть недостаточным.

Когда вклад $u_A(x)$ в суммарную неопределенность является значительным, но он основан на результатах наблюдений $n < 7$.

В этом случае рекомендуется устанавливать k равным значению коэффициента Стьюдента с соответствующим эффективным числом степеней свободы.

$$v_{eff} = (n - 1)[u_A + u_B]^2 / u_A^4$$

формула Велча-Саттерсвейта

Значение коэффициента $t_p(v)$ для случайной величины, имеющей распределение Стьюдента с v степенями свободы для уровня доверия 0,95

v	$t_p(v)$	v	$t_p(v)$
1	12,71	11	2,20
2	4,30	12	2,18
3	3,18	13	2,16
4	2,78	14	2,15
5	2,57	15	2,13
6	2,45	16	2,12
7	2,37	17	2,11
8	2,31	18	2,10
9	2,26	19	2,09
10	2,23	20	2,09

Формула Велча-Саттерсвейта

$$v_{eff} = \frac{[\sum_{i=1}^N u_i^2(y)]^2}{\sum_{i=1}^N u_i^4(y)/v_i} = \frac{(n-1)[u_A^2 + u_B^2]^2}{u_A^4}$$

Зависимость поправочного $t_p(v)/k_p$ от числа наблюдений

Число наблюдений, n	2	3	4	5	6	7	8	9
$t_p(v)/k_p$	7,0	2,3	1,7	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2

Значения коэффициента надежности h для числа измерений n (ISO/TS 14253-3:2011)

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
h	6,483	2,195	1,624	1,417	1,312	1,248	1,206	1,177	1,154

Оценка по типу А

Если число измерений по методике равно $m < 10$

Для правильной оценки неопределенности по типу А необходимо:

- выполнить $n > 10$ измерений, оценить экспериментальное стандартное отклонение:

$$s_k = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

- Оценить неопределенность по типу А:

$$u_A(x) = \frac{s_k}{\sqrt{m}}$$

где m – число измерений, предусмотренное методикой

Вычисление стандартных неопределенностей входных величин

Тип А	Тип В
1. Стандартная неопределенность единичного измерения i - й входной величины (повторяемость измерений) $u_A(x_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}$ где $\bar{x}_i = \frac{1}{n_i} \sum_{q=1}^{n_i} x_{iq}$ - среднее арифметическое результатов измерений i-ой входной величины.	1. Если известно <i>стандартное отклонение</i> входной величины, оно принимается равным стандартной неопределенности $u_B(x_i)$
2. Стандартная неопределенность измерений i-й входной величины, при которых результат определяют как среднее арифметическое, по формуле , где m – число измерений по методике, n – число предварительных измерений ($n \geq 10$) $u_A(\bar{x}_i) = \frac{1}{\sqrt{m}} \sqrt{\frac{\sum_{q=1}^{n_i} (x_{iq} - \bar{x}_i)^2}{m(n_i - 1)}}$	2. Если можно оценить лишь <i>верхнюю и нижнюю границы</i> входной величины a_+, a_-, то вычисление стандартной неопределенности следует производить в зависимости от вида предполагаемого распределения входной величины внутри границ .
	3. Если известна <i>расширенная неопределенность</i> $U(x_i)$ с коэффициентом охвата k, то стандартная неопределенность определяется как: $u(x_i) = \frac{U(x_i)}{k}$

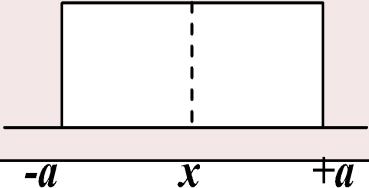
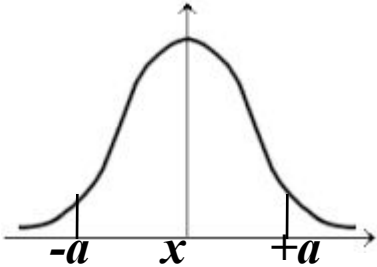
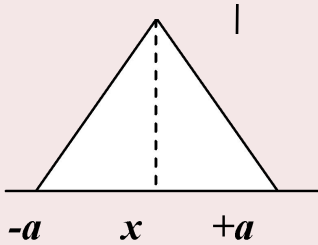
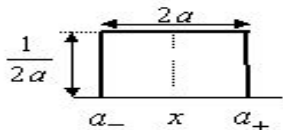
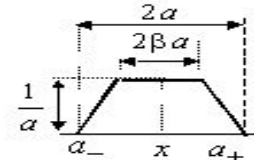
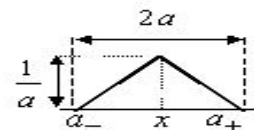
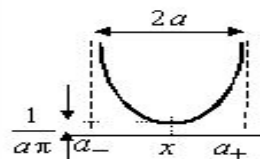
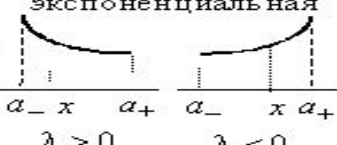
Распределение	Вид	Формулы для расчета стандартной неопределенности
Прямоугольное		$u_B = \frac{a}{\sqrt{3}}$
Нормальное		$u_B = \frac{a}{2}$
Треугольное		$u_B = \frac{a}{\sqrt{6}}$

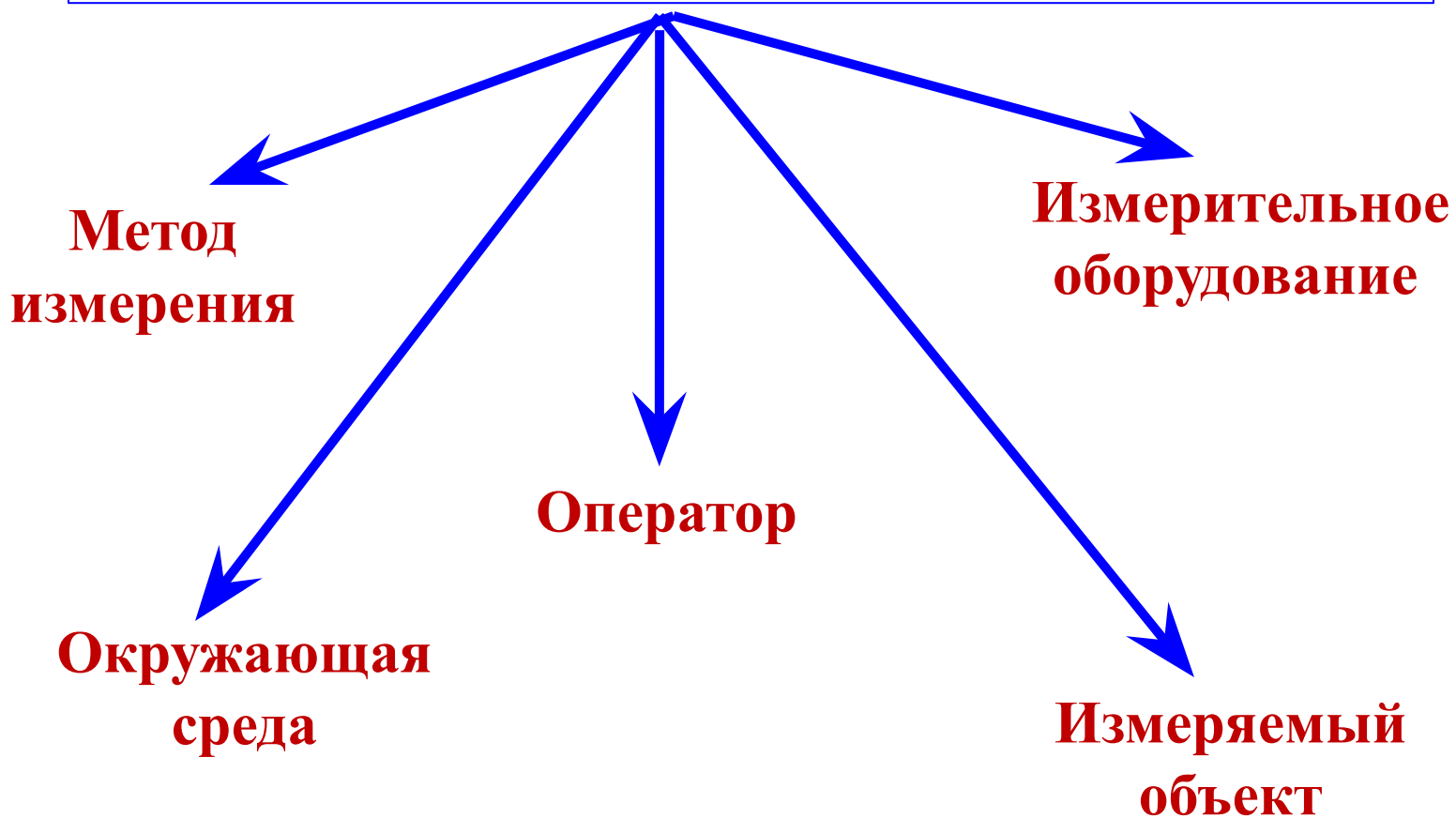
Таблица 3 – Формулы для вычисления стандартной неопределенности типа B при известных границах входной величины a_+ , a_-

Вид функции распределения	Формулы для расчета стандартной неопределенности	Случаи применения
Прямоугольная 	$u_B(X_i) = \frac{(a_+ - a_-)}{2\sqrt{3}} = \frac{a}{\sqrt{3}}$	В документации указаны предельные границы входной величины a_+, a_- или максимальное значение диапазона ($\pm a$) без указания формы распределения и уровня доверия.
Трапецидальная 	$u_B(X_i) = \frac{(a_+ - a_-)}{2\sqrt{6}} \sqrt{1 + \beta^2} = \frac{a}{\sqrt{6}} \sqrt{1 + \beta^2}$ $0 < \beta < 1$	1. В документации указаны максимальное значение диапазона ($\pm a$) симметричного распределения (без указания уровня доверия), у которого значения входной величины возле границ менее вероятны, чем те, которые находятся возле центра. 2. Когда входная величина может являться суммой или разностью двух величин, распределенных равномерно с разными значениями диапазонов.
Треугольная 	$u_B(X_i) = \frac{(a_+ - a_-)}{2\sqrt{6}} = \frac{a}{\sqrt{6}}$	1. Предельный случай трапецидального распределения при $\beta = 0$. 2. Когда входная величина может являться суммой или разностью двух величин, распределенных равномерно с одинаковыми значениями диапазонов.
Арксинусная 	$u_B(X_i) = \frac{(a_+ - a_-)}{2\sqrt{2}} = \frac{a}{\sqrt{2}}$	Входная величина связана синусоидальной функцией с аргументом, распределенным равномерно в интервале $[-\pi; \pi]$.
Асимметричная экспоненциальная  $\lambda > 0$ $\lambda < 0$	$u_B(X_i) = \frac{[(a_+ - x)(x - a_-) - (a_+ - 2x + a_-)/\lambda]^{0,5}}{\sqrt{3}}$	В случае асимметрии функции плотности вероятности, аппроксимируемой выражением $p(X_i) = A \exp[-\lambda(X_i - x)]$.

Фонд информации (для оценки по типу В) может включать

- данные предварительных измерений;
- данные, полученные в результате опыта, или общие знания о поведении свойствах соответствующих материалов и приборов;
- спецификации изготовителя;
- данные, которые приводятся в свидетельствах о калибровке и других сертификатах;
- неопределенности, приписываемые справочным данным.

Источники неопределенности при измерениях



Источники неопределенности при измерениях

1. Метод измерения:

- ❑ число наблюдений – изменение в повторных наблюдениях измеряемой величины при явно одинаковых условиях;
- ❑ длительность измерения;
- ❑ выбор методики измерения;
- ❑ выбор эталона или средства измерений;
- ❑ непрезентативная выборка - измеренный образец может не представлять измеряемую величину;
- ❑ неточные знания констант и других параметров, полученных из внешних источников;
- ❑ выбор подходящего фильтра, стандартного образца и т. д.
- ❑ аппроксимации и предположения, используемые в методе измерения и измерительной процедуре

Источники неопределенности при измерениях

2. Измерительное оборудование:

- неопределенность калибровки;
- вариация показаний;
- время, прошедшее с момента последней калибровки;
- применяемое программное обеспечение;
- порог чувствительности или конечная разрешающая способность;
- неполное определение измеряемой величины;
- несовершенная реализация определения измеряемой величины;
- неточные значения, приписанные эталонам, используемым для измерения, и стандартным образцам веществ и материалов
- температура и т.д.

Источники неопределенности при измерениях

3. Окружающая среда

- ☐ температура;
- ☐ влажность;
- ☐ давление;
- ☐ чистота помещения;
- ☐ магнитные и гравитационные поля;
- ☐ вибрация;
- ☐ различные излучения, свет и т. д.
- ☐ неадекватное знание эффектов от условий окружающей среды, влияющих на измерение, или несовершенное измерение условий окружающей среды

Источники неопределенности при измерениях

4. Измеряемый объект:

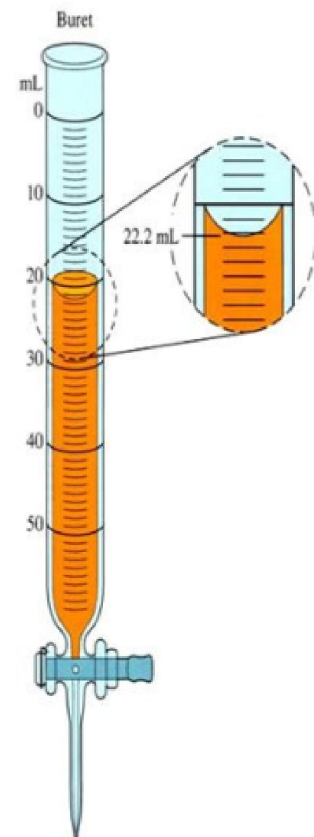
- ☐ температура;
- ☐ поверхность;
- ☐ материал;
- ☐ размеры;
- ☐ взаимодействие измеряемого объекта с условиями измерений;
- ☐ отклонение формы для геометрических измерений и т. д.

Источники неопределенности при измерениях

5. **Оператор:**

- ☐ измерительное усилие;
- ☐ опыт работы;
- ☐ выбор средства измерения;
- ☐ образование;
- ☐ параллакс;
- ☐ добросовестность;
- ☐ субъективная систематическая погрешность оператора при снятии показаний аналоговых приборов;
- ☐ манипулирование (ловкость рук) и т. д.

Person	Result
1	22.2
2	22.1
3	22.3
4	22.0



Неопределенность измерений



*Неопределенность
измеряемой
величины*

*Неопределеннос
ть
моделирования*

*Неопределенность
спецификации*

*Естественные
неопределенност
и*



*Неопределеннос
ть
измерительного
эксперимента*

*Методические
неопределеннос
ти*

*Инструменталь
ные
неопределеннос
ти*

*Субъективные
неопределенност
и*

Неопределенность моделирования

- **Представление об объекте измерения – модель-отличается от свойств реальных объектов – не может быть абсолютной копией оригинала.**
- **Отличие модели и оригинала выражается неопределенностью, обусловленной неадекватностью модели измеряемой величине.**

Пример: измерение диаметра вала D.

$\bar{D}$ - среднее значение

$$s(\bar{D}) = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{k=1}^n (D_k - \bar{D})^2}$$

-неопределенность среднего значения

Неопределенность спецификации

- **Корректный подход к измерению требует полного предварительного *описания (спецификации)* измеряемой величины, которое включает в себя указания на время проведения измерений и условия их проведения.**
- **Условия проведения измерений указываются в виде совокупности влияющих величин**
 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$

Зависимость измеряемой физической величины Y от параметров внешних влияний описывается посредством функции влияния
 $Y = f(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$

**Оценку неопределенности спецификации можно получить, определив
(по типу В) стандартные неопределенности влияющих величин**

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{k=1}^m \left(\frac{\partial f}{\partial \theta} \right)^2 u^2(\theta_i)}$$

0

На практике спецификация или определение измеряемой величины зависит от требуемой точности измерения. Измеряемую величину следует определять с достаточной полнотой по отношению к требуемой точности, чтобы для всех практических целей, связанных с измерением, ее значение было единственным.

Пример *Длину l стального стержня с номинальной длиной l м нужно воспроизвести (измерить) с точностью до микрометра.*

Его спецификация должна включать конкретные значения тех величин, которые могут влиять на длину стержня, например

- температуры,*
- атмосферного давления,*
- возможно положение (горизонтальное или вертикальное) стержня, при которых эта длина определяется.*
- Значит, до составления спецификации измеряемой величины необходимо предварительно оценить степень влияния этих величин*

Известно, что коэффициент α линейного теплового расширения стали равен $20 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

Следовательно, при изменении температуры стержня на 1°C абсолютное изменение длины Δl равно **20 мкм**. Поскольку длину стержня нужно определить с точностью до микрометра, оказывается, недостаточно температуру стержня давать с точностью до 1°C .

Недостаточна и точность $0,1^\circ\text{C}$, поскольку, при изменении температуры стержня на $0,1^\circ\text{C}$ абсолютное изменение Δl длины стержня будет в 10 раз меньше, чем при изменении температуры на 1°C т.е. равно **2 мкм**.

При изменении температуры стержня на $0,01^\circ\text{C}$ абсолютное изменение Δl длины стержня будет в 100 раз меньше, чем при изменении температуры на 1°C , т.е. равно **0,2 мкм**. Такая точность задания температуры удовлетворяет условие измерительной задачи.

Оценки действия атмосферного давления (при изменении на **100 кПа**) и собственного веса стержня (при вертикальном положении) на его длину показали, что длина стержня изменяется соответственно на **0,5** и **0,13 мкм**. Следовательно, их влияние намного меньше, чем требуемая точность измерения.

Таким образом, измеряемую величину следует специфицировать, как, пример, длина стержня при температуре $25,00^\circ\text{C}$.

Однако если длина должна быть определена только с точностью до миллиметра, то ее спецификация не требует определения температуры или давления или значения любого другого определяющего параметра.

Естественные неопределенности

- **дискретность физических величин на квантово-механическом уровне (измерение заряда - не точнее заряда электрона, $\Delta q \geq \pi \hbar$ — принцип неопределенности Гейзенберга)**
- **шумы и дробовой эффект (броуновское движение, тепловые шумы, дробовой эффект, квантовый шум)**

Методические составляющие неопределенности

- **составляющие, обусловленные неадекватностью выбранной модели объекта измерений его свойствам;**
- **составляющие, обусловленные отклонением от номинальных значений параметров функции, связывающей измеряемую величину с величиной на входе средства измерений;**
- **составляющие, обусловленные квантованием по уровню (при использовании средств измерения с аналого-цифровым преобразованием);**
- **составляющие, обусловленные вычислительными алгоритмами.**

Инструментальные составляющие неопределенности

- основная погрешность средства измерений;
- дополнительные погрешности средства измерений;
- составляющая, обусловленная вариацией (гистерезисом) средства измерений;
- составляющая, обусловленная взаимодействием средства измерений с объектом измерений;
- динамическая составляющая, обусловленная инерционностью средства измерений;
- составляющие, связанные с отбором и приготовлением проб веществ.

Субъективные составляющие неопределенности

- составляющие, обусловленные неточностью отсчетов результатов измерений со шкалы или диаграммы средства измерений;
- составляющие, обусловленные воздействием оператора на объект и средства измерений (искажение температурного поля, механические воздействия и т.п.)

Этапы оценки неопределенности

1. описание процесса измерения и составление его модели;
2. оценивание значений и неопределенностей входных величин;
3. анализ корреляций;
4. составление бюджета неопределенности;
5. расчет результата измерения;
6. расчет суммарной стандартной неопределенности;
7. расчет расширенной неопределенности;
8. представление конечного результата измерения

1. Описание процесса измерения и составление его модели

Модельное уравнение выражает зависимость между выходной (измеряемой) величиной Y и входными величинами $X_1, X_2 \dots X_n$

$$Y = f(X_1, X_2 \dots X_n)$$

ПРИМЕРЫ:

Определение скорости транспортного средства:

$$V = \frac{L}{T}$$

Приготовление градуировочного раствора кадмия:

$$c_{Cd} = \frac{100 \cdot m \cdot P}{V}$$

Калибровка портативного цифрового мультиметра:

$$E_x = V_{ix} - V_s + \delta V_{ix} - \delta V_s$$

2. Оценивание значений и неопределенностей входных величин

Оценкой x_i входной величины X_i могут быть:

- ❖ показания измерительного прибора в случае однократного измерения;
- ❖ среднее арифметическое значение при многократных измерениях;
- ❖ информация, заимствованная из нормативных документов, сертификатов, свидетельств, справочников, этикеток производителя продукции и пр.

$$V = \frac{L}{T}$$

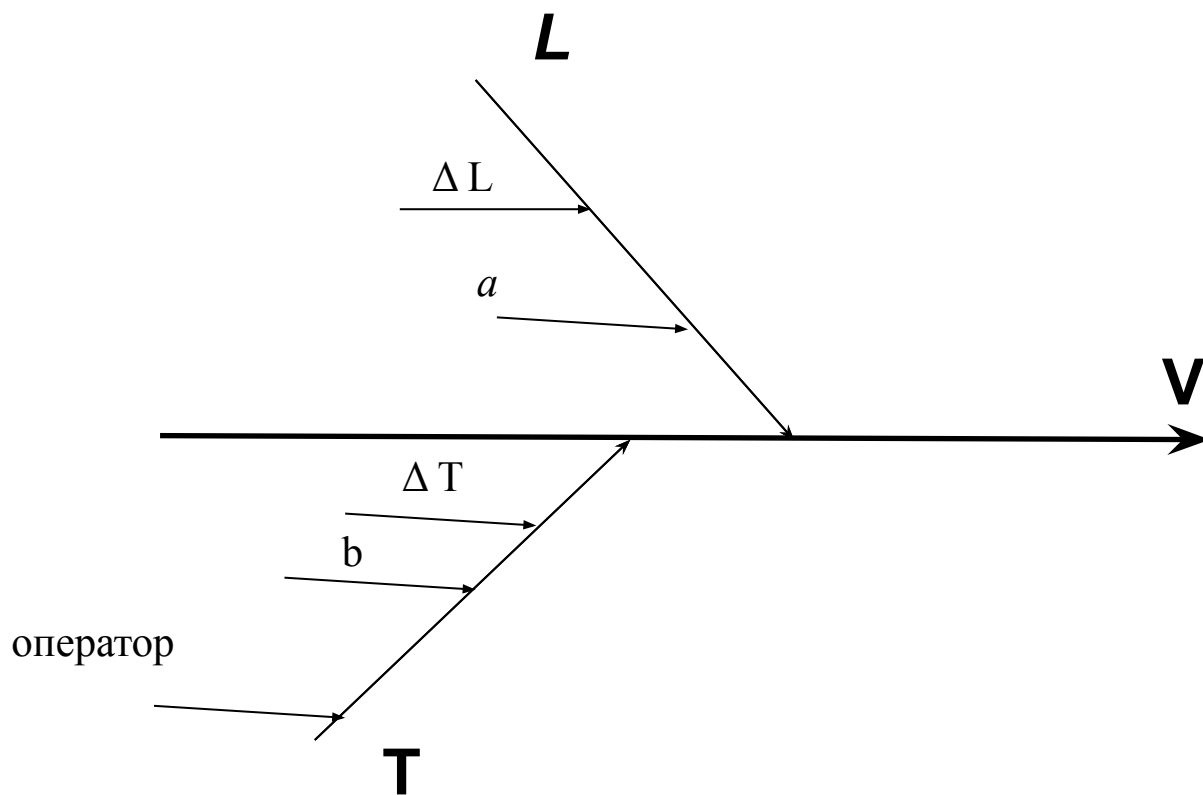


Диаграмма Ишикавы

3. Анализ корреляций

Корреляция между двумя входными величинами может существовать, если при их определении используют :

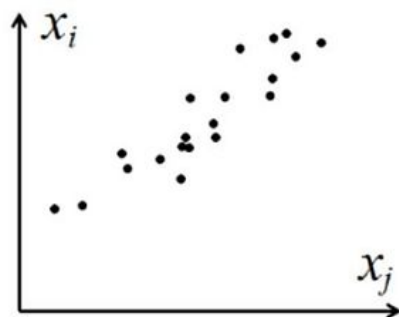
- один и тот же измерительный прибор;
- физический эталон измерения;
- справочные данные, имеющие значительную стандартную неопределенность.

Мерой взаимной зависимости или корреляции двух случайных величин является **ковариация**.

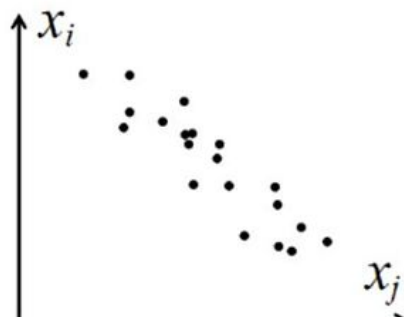
Ковариация, связанная с оценками двух входных величин может устанавливаться равной нулю или рассматриваться как пренебрежимо малая, если:

- -обе входные величины являются независимыми друг от друга,
- одна из входных величин может рассматриваться как константа,
- исходя из наших знаний и предположений, просто не имеется никаких оснований для корреляции между входными величинами

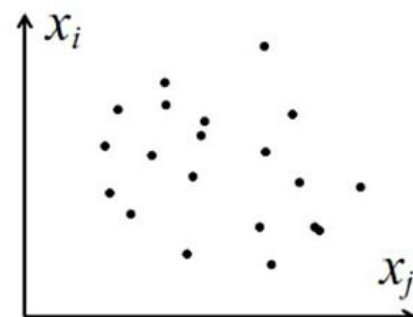
Учет корреляции при оценивании неопределенности измерений



$$r_{ij} > 0$$



$$r_{ij} < 0$$



$$r_{ij} = 0$$

Вычисление коэффициента корреляции

При наличии согласованных пар измерений x_{ik} и x_{jk} , $k = 1, 2, \dots, n$, коэффициент корреляции вычисляется по типу А по формулам:

$$r_{i,j} = \frac{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{j=1}^n (x_{ik} - \bar{x}_i)(x_{jk} - \bar{x}_j)}{u_A(\bar{x}_i)u_A(\bar{x}_j)}.$$

$$u_A(y) = \sqrt{u_{iA}^2(y) + u_{jA}^2(y) + 2r_{ij}u_{iA}^2(y)u_{jA}^2(y)}$$

3. Составление бюджета неопределенности

Величина X_i ,	Единица величины	Значение оценки x_i	Интервал $\pm \Delta a$	Тип неопределенности	Распределение вероятностей	Стандартная неопределенность, $u(x_i)$	Коэффициент чувствительности, c_i	Вклад неопределенности $u(y_i) = c_i \cdot u(x_i)$	Процентный вклад %
L	км	0,200	ΔL	В	прямоуголь.	$u_{B1}(L) = \frac{\Delta L}{\sqrt{3}}$			
			a	В	прямоуголь.	$u_{B2}(L) = \frac{a}{\sqrt{3}}$	c_L		
T	ч	0,004	ΔT	В	прямоуголь.	$u_{B1}(T) = \frac{\Delta T}{\sqrt{3}}$			
			b	В	прямоуголь.	$u_{B2}(T) = \frac{b}{\sqrt{3}}$			
				А	нормальное	$u_A(T) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (t_i - \bar{T})^2}{n(n-1)}}$	c_T		
V	км/м	50			$u_c(V) = \sqrt{c_L^2 u^2(L) + c_T^2 u^2(T)}$				

4. Составление бюджета неопределенности

Таблица 4 – Схема бюджета неопределенности

Входная величина X_i	Оценка входной величины x_i	Стандартная неопределенность $u(x_i)$	Тип неопределенности	Распределение вероятностей входной величины	Коэффициент чувствительности c_i	Вклад неопределенности $u_i(y)$
X_1	x_1	$u(x_1)$	A (B)		c_1	$u_1(y)$
X_2	x_2	$u(x_2)$	A (B)		c_2	$u_2(y)$
X_N	x_N	$u(x_N)$	A (B)		c_N	$u_N(y)$
Y	Y					$u(y)$

5. Расчет результата измерений

$$V = 0,200 : 0,004 = 50,00 \text{ км/ч}$$

6. Расчет суммарной стандартной неопределенности

$$u_c(V) = \sqrt{c_L^2 u^2(L) + c_T^2 u^2(T)}$$

7. Расчет расширенной неопределенности

$$U(V) = k \cdot u_c(V)$$

P	50%	68,27%	90%	95%	95,45%	99%	99,73 %
k	0,67	1	1,645	1,96	2	2,576	3

8. Представление конечного результата измерения

$$V \pm U(V) \text{ при } k = 2 \quad P = 95\%$$

Схема вычисления неопределенности $u(y)$ результата измерения

Вычисление стандартных неопределенностей $u(y)$ входных величин $X_1, X_2, \dots, X_n$

По типу А

$u_A(X_i)$

$$s(\bar{X}) = \sqrt{s^2} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$$

По типу В

$u_B(X_i)$

U/k

$a/\sqrt{3}$

Вычисление суммарной стандартной неопределенности $u_c(y)$ результата измерения y

Общий случай $y=f(X_1, \dots, X_n)$

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n C_i^2 u^2(X_i)} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial X_i} \right)^2 u^2(X_i)}$$

Суммирование $u(X_i)$ по правилу 1, если $y=X_1+X_2+\dots+X_n$

Правило 1

$$u_c(y) = \sqrt{u^2(X_1) + u^2(X_2) + \dots + u^2(X_n)}$$

Суммирование $u(X_i)$ (ОСО) по правилу 2, если $y=X_1 \cdot X_2 \cdot \dots \cdot X_n$

Правило 2

$$u_c(y) = y \cdot \sqrt{\left(\frac{u(X_1)}{X_1} \right)^2 + \left(\frac{u(X_2)}{X_2} \right)^2 + \dots + \left(\frac{u(X_n)}{X_n} \right)^2}$$

$u_c(y)$

Вычисление расширенной неопределенности U

$$U = k u_c(y)$$

Для того, чтобы просуммировать составляющие неопределенности часто вместо использования общего подхода с вычислением частных производных всего выражения, удобнее разбить исходную математическую модель на отдельные выражения, состоящие только из тех операций, которые попадают под вышеназванные правила

Например, выражение

$$y = \frac{(t + p)}{(q + r)}$$

- следует разбить на две части $(t+p)$ и $(q+r)$,
- вычислить сначала промежуточные неопределенности по правилу 1 для каждой из этих частей,
- промежуточные неопределенности суммировать по правилу 2 и получить суммарную стандартную неопределенность $u_c(y)$

Правило записи результата измерения.

Расширенная неопределенность результата измерений представляется числом, содержащим не более двух значащих цифр

Округление производится лишь в окончательном ответе, а все предварительные вычисления проводят с одним - двумя лишними знаками

Если числовое значение неопределенности из-за округления уменьшается более, чем на 5%, то значение неопределенности следует указывать округленным в сторону увеличения (с избытком).

Результат измерения округляется до того же десятичного разряда, которым оканчивается округленное значение неопределенности.

Оценка соответствия является важным аспектом в следующих областях:

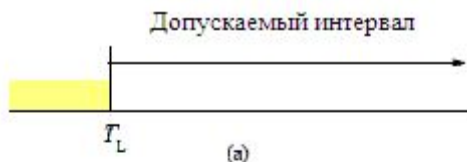
- **контроль качества продукции** (на производстве принимаются решения о соответствии продукции требованиям конструкторской документации)
- **сфера законодательной метрологии** (поверка средств измерений),
- **обеспечение безопасности** (уровень радиации, уровень загрязнения окружающей среды)
- **охрана здоровья** (состав лекарственных препаратов).

Область допуска

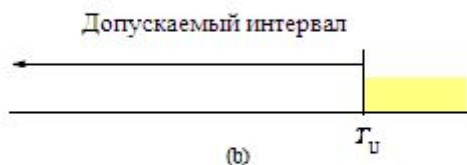
Область допускаемых значений определяется одним или двумя предельными значениями.

В каждом случае, объект соответствует заданному требованию, если значение измеряемой величины лежит внутри области допуска и является несоответствующим в противном случае.

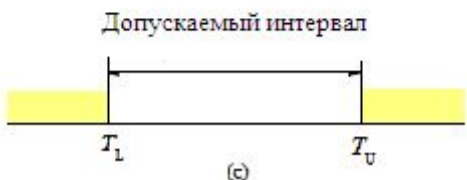
Интервал допуска, допускаемый интервал



Прибор считается выдержавшим испытания, если его сопротивление изоляции не менее 10 МОм.

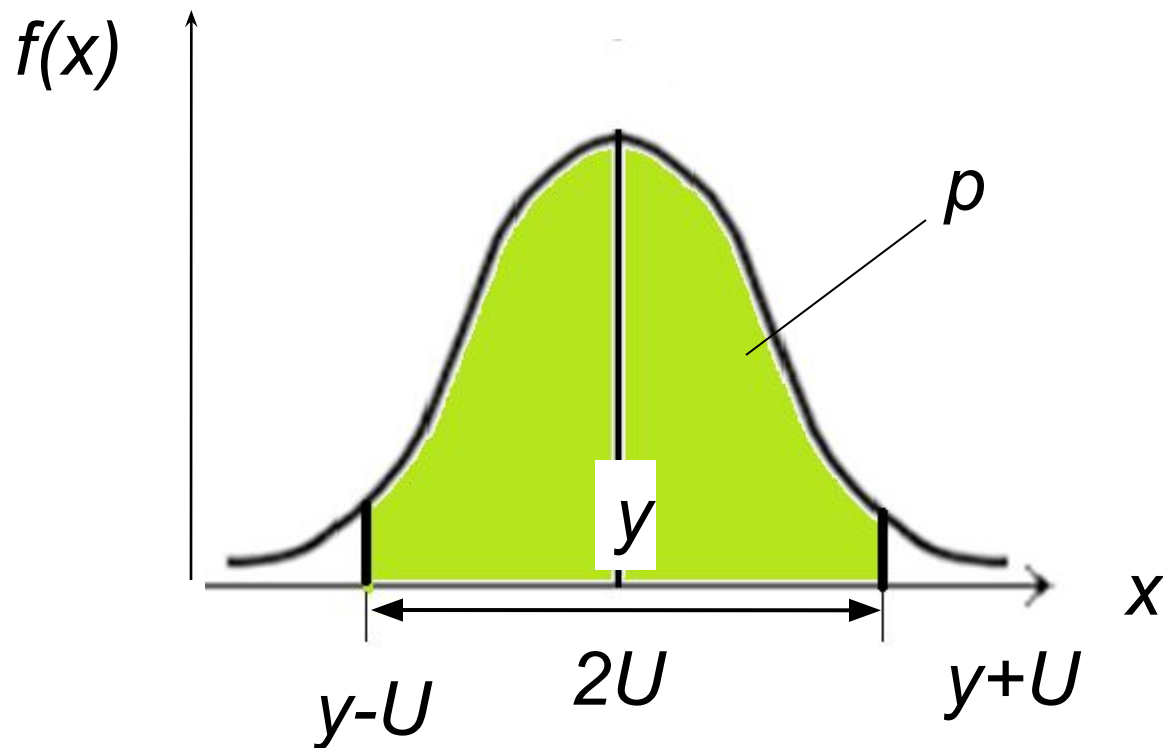


Массовая концентрация ртути в промышленных сточных водах по нормативам не должна превышать 10 нг/л.



Термометры электронные медицинские типа OMRON имеют абсолютную погрешность $\pm 0,1^\circ\text{C}$

В законодательной метрологии для средств измерений используется понятие **максимальная допустимая погрешность (показаний)** – *maximum permissible measurement error (of indication) MPE* – максимальная разница между показанием прибора и измеряемой величиной, допускаемая спецификацией или нормативными документами

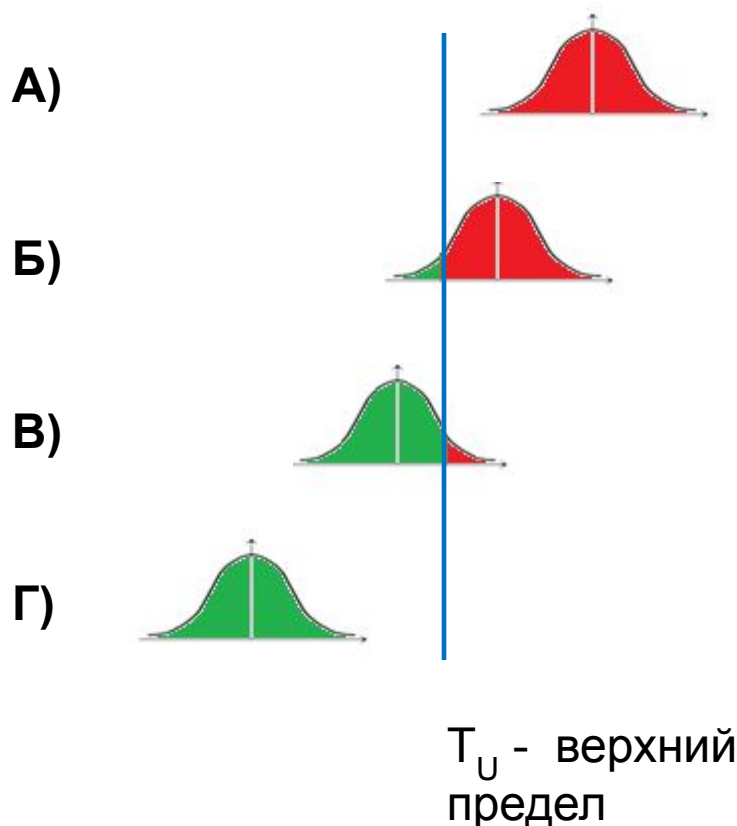


$$U = k u_c(y)$$

$$k = 1,96 \approx 2 \quad \text{при } P = 95\%$$

**Плотность распределения вероятности
результата измерения**

Оценка соответствия с верхним интервалом

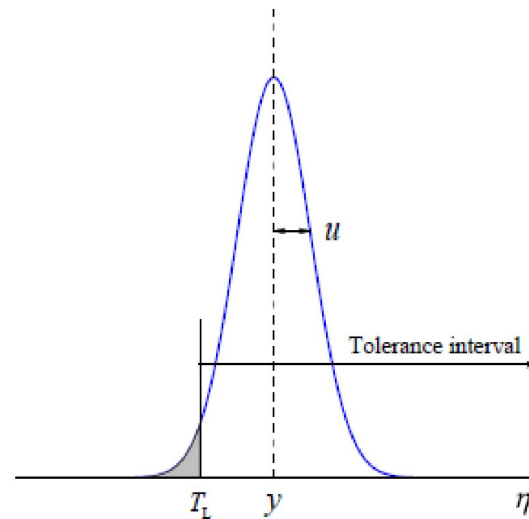
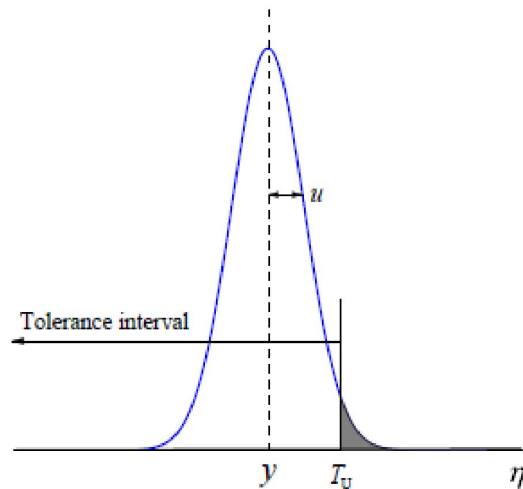


А) не соответствует
Г) соответствует
требованиям, определенным верхней
допустимой границей.

Решение о соответствии результатов
измерений заданным требованиям
связано с рисками принятия
неправильных решений о соответствии
в случае

Б) - риск потребителя и
В) – риск производителя

Как правило, плотность вероятности распределения расширенной
неопределенности является нормальным



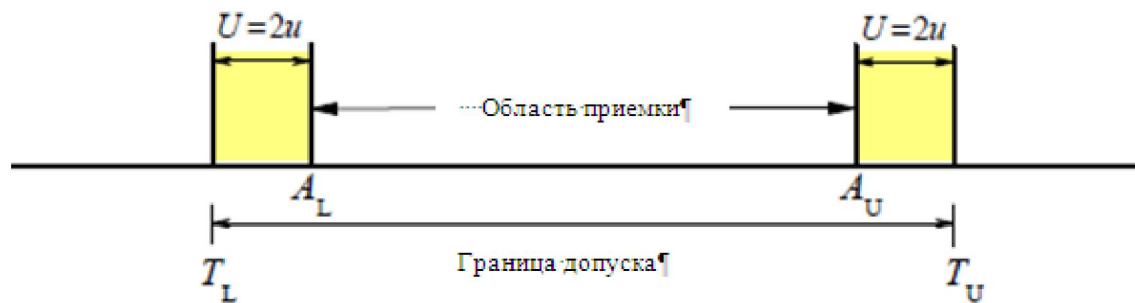
Риск ошибочного соответствия –
риск потребителя.

Испытания рассматриваются как прошедшие, но само значение возможно лежит вне области МРЕ.

Риск ошибочного отклонения –
риск изготовителя.

Испытания показывают несоответствие, но значение возможно лежит в области МРЕ

Риски



Риск принятия несоответствующего объекта может быть уменьшен путем установления допустимого предела A_U внутри области допуска (область приемки).

Интервал, определяемый T_U и A_U называется защитной полосой и правило результирующего решения называется защищенной приемкой.

Литература

1. Руководство по выражению неопределенности измерения, Санкт-Петербург, 1999.
2. Количественное описание неопределенности в аналитических измерениях. Руководство ЕВРАХИМ/СИТАК, Санкт-Петербург, 2002.
3. РМГ 43-2001 «Применение. «Руководства по выражению неопределенности измерений».
4. СТ РК 2.184-2010 «ГСИ РК. Оценка неопределенности при калибровке/поверке средств измерений».
5. СТ РК 2.181-2010 «Совместимость технических средств электромагнитная. Неопределенность измерений в области электромагнитной совместимости».
6. DKD-3 «Выражение неопределенности измерений при калибровке» (ЕА-4/02).
7. И.П. Захаров, В.Д. Кукиш «Теория неопределенности в измерениях», «Консум», Харьков, 2002
8. А.И. Походун «Экспериментальные методы исследований. Погрешности и неопределенности измерений» (учебное пособие), Санкт-Петербург, 2006.
9. Ю. Ефремова «Оценка неопределенности в измерениях» (практическое пособие), БелГИМ, Минск, 2003.
10. Н.Ю. Ефремова «Примеры оценивания неопределенности величин из различных областей измерений и испытаний» (практическое пособие), БелГИМ.
11. Д.М. Муканов, А.А. Петров, А.Л. Вагина, С.В. Радионова «Неопределенность результат измерений ». Методическое пособие, Алматы, 2002.
12. О.Ш. Хакимов, В.Б. Латипов «Оценка неопределенности измерений». Учебное пособие, Ташкент:НИИСМС, 2008.
13. СТ РК ИСО 21748-2010 Руководство по использованию оценок повторяемости, воспроизводимости и точности при оценивании неопределенности измерений»
14. И.П. Захаров «Неопределенность измерений для чайников и ...начальников». Учебное пособие, Харьков, 2013

Литература

15. СТ РК 2.211-2011 ГСИ РК. Определение неопределенности при измерениях объема с применением гравиметрического метода
16. СТ РК 2354-2013 Калибровка грузопоршневых манометров
17. СТ РК 2362-2013 Неопределенность результатов калибровки средств измерений силы
18. СТ РК 2389-2013 Прослеживаемость в химических измерениях. Руководство по достижению сопоставимых результатов в химических измерениях
19. СТ РК 2390-2013 Неопределенность измерений, возникающая в результате отбора проб. Руководство по методам и подходам
20. СТ РК ИСО 14253-2012 Геометрические характеристики изделий (GPS). Контроль измерением обрабатываемых изделий и измерительная аппаратура. Часть 2. Руководство по оценке неопределенности в области измерения геометрических параметров продукции при калибровке измерительного оборудования и контроле продукции
21. СТ РК 2.317-2016 «Выражение неопределенности и достоверности результатов измерений» (с 01.01.2017)
22. СТ РК 2.347-2015 «Оценка данных об измерении. Роль неопределенности в оценке соответствия»
23. ПМ Х 33.1405-2005 «Оценивание неопределенности при проведении метрологических работ. Рекомендация» ГП «Харьковстандартметрология», разработчики: Захаолв ИюП., проф. ХНУРЭ и др.
24. А.В.Гармаш, Н.М.Сорокин «Метрологические основы аналитической химии», Москва 2012, МГУ им. М.В.Ломоносова, Химический факультет

Определить значение массы гири с номинальным значением 10 кг методом сравнения с эталонной гирей, используя компаратор массы.

Математическая модель измерения

$$m_k = m_z + \delta m_z + \delta m + \delta m_c + \delta B$$

	Значение оценки x_i, g	Интер- вал $\pm a$, мг	Тип нео- пр.	Распределен. вероятностей	Стандарт неопред. мг	Коэф. чувстви- тель.	Вклад неопред.	
							мг	%
Масса эталонной гири (m_z) (из сертификата калибровки)	10000,005	45	B	нормальное	22,5	1,0	22,5	59,1
Изменение массы эталонной гири со времени последней калибровки (δm_z)	0,000	15	B	прямоугольное	8,66	1,0	8,7	8,8
Наблюдаемая разница между массами калибруемой и эталонной гирь (δm)	0,020		A	нормальное	14,4	1,0	14,4	24,3
Поправка на эксцентриситет нагрузки и магнитные эффекты (δm_c)	0,000	10	B	прямоугольное	5,77	1,0	5,8	3,9
Поправка для силы выталкивания воздуха (δB)	0,000	10	B	прямоугольное	5,77	1,0	5,8	3,9
Значение выходной величины масса калибруемой гири (m)					29,3			

Расширенная неопределенность $U(m) = 1,96 \cdot 29,3 = 57,428 \approx 58 \text{ мг}$

Масса гири $m = (10000,025 \pm 0,058) \text{ г}$ при $k=1,96$ $P=95\%$

Производится косвенное измерение плотности ρ стального шара по результатам измерения его массы m и диаметра D .

Показания настольных циферблатных весов ВНЦ-2 составляют $m=198$ г, отчет по шкале штангенциркуля ШЦ-II составляет 36,6 мм.

Измерения производятся в лабораторных условиях $+25^{\circ}\text{C}$.

Технические характеристики применяемых средств измерений:

Весы ВНЦ-2- цена деления 1 мг, погрешность не превышает 0,5 деления шкалы.

Штангенциркуль ШЦ-II – цена деления 0,05 мм, погрешность 0,05 мм.

Математическая модель измерения:

$$\rho = \frac{6m}{\pi D^3}$$

Величины не коррелированы

Вычислим плотность шара по данным измерений:

$$\rho = \frac{6 \cdot 0,198}{3,14 \cdot 0,0366^3} = 7717 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Находим стандартную неопределенность оценки входной величины ***m***

в предположении прямоугольного распределения вероятности в пределах границ погрешности весов:

$$u^I(m) = \frac{0,0005}{\sqrt{3}} = 0,00029 \text{ з}$$

в предположении прямоугольного распределения вероятности в пределах границ цены деления весов:

$$u^{II}(m) = \frac{0,001}{2\sqrt{3}} = 0,00029 \text{ з}$$

$$u(m) = \sqrt{(u^I(m))^2 + (u^{II}(m))^2} = \sqrt{\left(\frac{0,0005}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0,001}{2\sqrt{3}}\right)^2} = 0,00041 \text{ з}$$

Находим стандартную неопределенность оценки входной величины ***D***

в предположении прямоугольного распределения вероятности в пределах границ погрешности штангенциркуля:

$$u^I(D) = \frac{0,00005}{\sqrt{3}} = 0,000029 \text{ м}$$

в предположении прямоугольного распределения вероятности в пределах границ цены деления штангенциркуля:

$$u^{II}(D) = \frac{0,00005}{2\sqrt{3}} = 0,000015 \text{ м}$$

$$u(D) = \sqrt{(u^I(D))^2 + (u^{II}(D))^2} = \sqrt{\left(\frac{0,00005}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{0,00005}{2\sqrt{3}}\right)^2} = 0,000033 \text{ м}$$

Находим стандартную неопределенность константы ***π***

$$u(\pi) = \frac{0,01}{2\sqrt{3}} = 0,0029$$

Вычислим коэффициенты чувствительности для каждой входной величины:

$$c_m = \frac{\partial \rho}{\partial m} = \frac{6}{\pi D^3} \Big|_{\pi=3,14 \ D=0,0366 \text{ м}} = \frac{6}{3,14 \cdot 0,0366^3} = 3,90 \cdot 10^4 \text{ м}^{-3}$$

$$c_D = \frac{\partial \rho}{\partial D} = -\frac{18m}{\pi D^4} \Big|_{\pi=3,14 \ D=0,0366 \text{ м} \ m=0,198 \text{ кг}} = \frac{18 \cdot 0,198}{3,14 \cdot 0,0366^4} = 63,3 \cdot 10^4 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-4}$$

$$c_\pi = \frac{\partial \rho}{\partial \pi} = -\frac{6m}{\pi^2 D^3} \Big|_{\pi=3,14 \ D=0,0366 \text{ м} \ m=0,198 \text{ кг}} = -\frac{6 \cdot 0,198}{3,14^2 \cdot 0,0366^3} = 2,46 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$$

Суммарная стандартная неопределенность выходной величины вычисляется по формуле:

$$\begin{aligned} u(\rho) &= \sqrt{c_m^2 u^2(m) + c_D^2 u^2(D) + c_\pi^2 u^2(\pi)} = \\ &= \sqrt{(3,9 \cdot 10^4)^2 \cdot 0,00041^2 + (6,33 \cdot 10^5)^2 \cdot 0,000033^2 + (2,46 \cdot 10^2)^2 \cdot 0,0029^2} \\ &= 27,25 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3} \end{aligned}$$

Величина X_i ,	Единица величины	Значение оценки x_i	Интервал $\pm \Delta a$	Тип неопределенности	Распределение вероятностей	Стандартная неопределенность, $u(x_i)$	Коэффициент чувствительности, c_i	Вклад неопределенности $u(y_i) = c_i \cdot u(x_i)$	Процентный вклад %
m	кг	0,198	0,0005	В	Прямоугол.	0,00029			
			0,001/2	В	Прямоугол.	0,00029			
						0,00041	$3,9 \cdot 10^4 \text{ м}^{-3}$	$15,99 \text{ кг/м}^3$	36,3
D	м	0,0366	0,00005	В	Прямоугол.	0,000029			
			0,00005/2	В	Прямоугол.	0,000015			
						0,000033	$63,3 \cdot 10^5 \text{ кгм}^{-4}$	$20,89 \text{ кг/м}^3$	47,5
π		3,14	0,001/2	В	Прямоугол.	0,0029	2460 кгм^{-3}	$7,13 \text{ кг/м}^3$	16,2
ρ	кг/м ³	7717						$27,25 \text{ кг/м}^3$	

° Документы по оценке неопределенности дают только схему оценивания неопределенности, они не могут заменить критическое мышление, интеллектуальную честность и профессиональное мастерство, необходимые при анализе и оценивании неопределенности.

Качество и ценность полученной неопределенности измеряемой величины в конечном счете зависит от понимания, критического анализа и честности тех, кто участвует в приписывании ее значения.

Неопределенность измерений не означает сомнения в достоверности измерения;

- наоборот, знание неопределенности предполагает **увеличение степени достоверности результата измерения**

Документы по оценке неопределенности дают только схему оценивания неопределенности, они не могут заменить критическое мышление, интеллектуальную честность и профессиональное мастерство, необходимые при анализе и оценивании неопределенности.

Качество и ценность полученной неопределенности измеряемой величины в конечном счете зависит от понимания, критического анализа и честности тех, кто участвует в приписывании ее значения.

**БЛАГОДАРЮ ЗА
ВНИМАНИЕ**