

**Метрология,
величины,
единицы физ.величин,
шкалы**



«... наука начинается с тех пор, как начинают измерять; точная наука немыслима без меры...». «В природе мера и вес – суть главные орудия познания...».
Дмитрий Иванович Менделеев

Метрология – это наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства (измерений) и способах достижения требуемой точности (результатов измерений).

Измерение – извлечение (к.-л. определенным способом или методом) количественной информации о свойствах объекта опытным путём (экспериментально).

Единство измерений – это единообразие понимания, толкования и восприятия как результатов измерений, так и используемой терминологии. Этот принцип закреплён законодательно.

Предметом метрологии являются способы и методы извлечения измерительной информации о свойствах объектов с заданной точностью, полнотой и достоверностью. Средства метрологии – это совокупность средств измерений и метрологических стандартов, обеспечивающих их рациональное использование.

В зависимости от предмета различают три раздела метрологии:

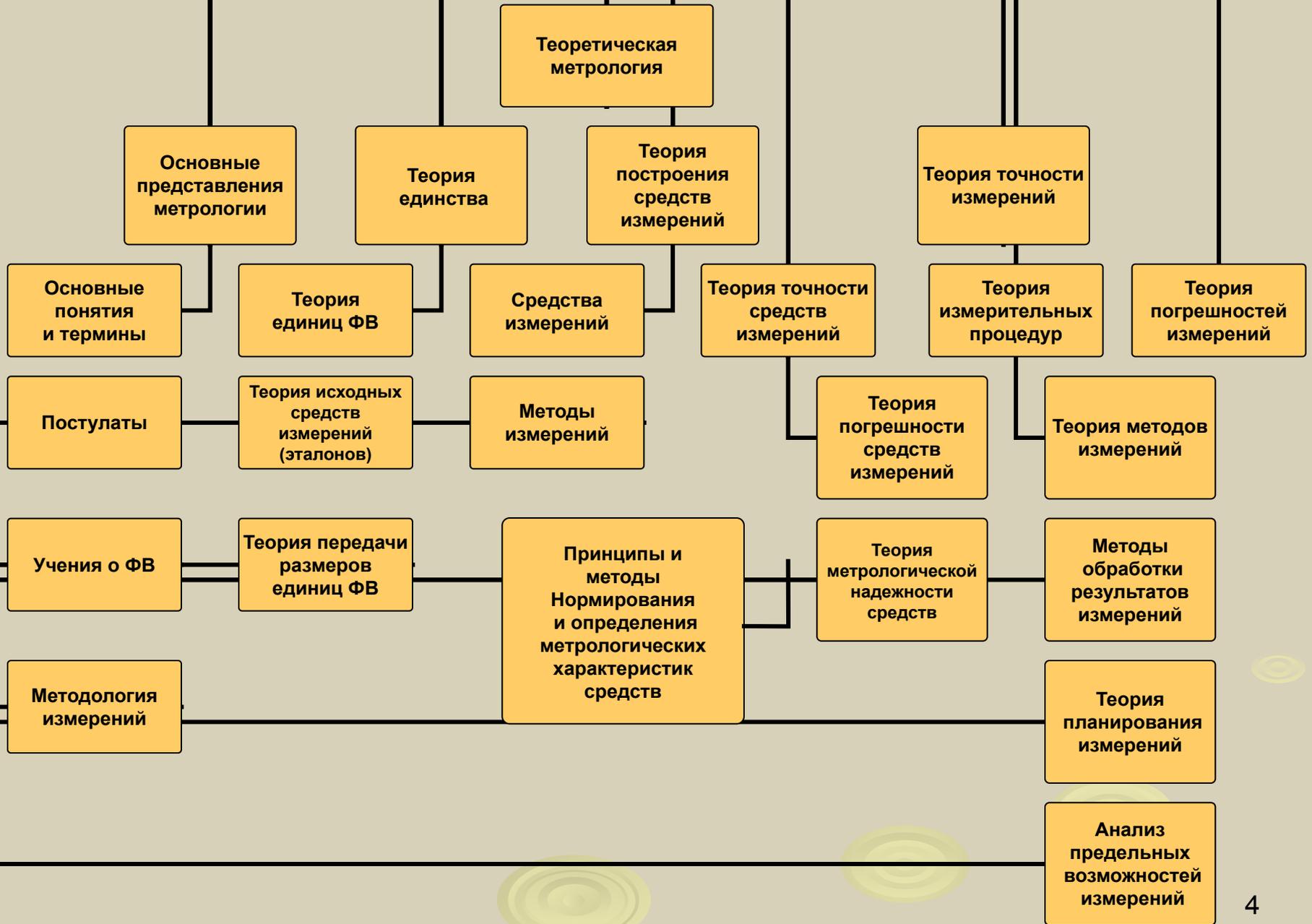


Раздел метрологии, предметом которого является разработка фундаментальных основ метрологии .

Раздел метрологии, предметом которого является установление обязательных технических и юридических требований по применению единиц ФВ, эталонов, методов и средств измерений, направленных на обеспечение единства и необходимой точности измерений в интересах общества.

Раздел метрологии, предметом которого являются вопросы практического применения разработок теоретической метрологии и положений законодательной метрологии.

Структура теоретической метрологии



Физические свойства и величины

Все объекты окружающего мира характеризуются своими свойствами.

Свойство – философская категория, выражающая такую сторону объекта (явления, процесса), которая обуславливает его различие или общность с другими объектами (явлениями, процессами) и обнаруживается в его отношениях к ним.

Свойство – категория качественная. Для количественного описания различных свойств процессов и физических тел вводится понятие величины.

Величина – это свойство объекта, которое может быть выделено среди других свойств и оценено тем или иным способом, в том числе и количественно.

Физическая величина - одно из свойств объекта (физического объекта, физической системы, явления или процесса), общее в качественном отношении для многих физических объектов, но в количественном отношении индивидуальное для каждого из них.

Классификация величин



Качественная характеристика измеряемых величин

Размерность служит формализованным отражением качественного различия между измеряемыми физическими величинами.

Размерность физической величины $\dim Q$ – выражение в форме степенного многочлена, составленного из произведений символов основных физических величин в различных степенях и отражающее связь данной ФВ с ФВ, принятыми в данной системе за основные с коэффициентом пропорциональности, равным 1: $\dim Q = L^\alpha M^\beta T^\gamma I^\eta \dots$,

где L, M, T, I – размерности соответствующих основных ФВ;

$\alpha, \beta, \gamma, \eta$ – показателем размерности.

Каждый из показателей размерности может быть положительным или отрицательным, целым или дробным числом, нулём.

Если все показатели размерности равны нулю, то такую величину называют *безразмерной*.

При определении размерности производных ФВ руководствуются следующими правилами:

1. Размерности левой и правой частей уравнения равны между собой.
2. Алгебра размерностей мультипликативна, т.е. состоит всего лишь из двух действий – умножения и деления.
3. Размерность произведения нескольких величин равна произведению их размерностей. Так, если зависимость между величинами имеет вид $Q=A*B*C$, то
$$\dim Q = \dim A * \dim B * \dim C$$
4. Размерность частного при делении одной величины на другую равна отношению их размерностей, т.е. если $Q=A/B$, то
$$\dim Q = \dim A / \dim B$$
5. Размерность любой величины, возведенной в степень, равна её размерности в той же степени. Так, если $Q=A^n$, то

$$\dim Q = \prod_n^1 \dim A = \dim^n A$$

Количественная характеристика измеряемых величин

Размер физической величины – это ее количественная определенность, присущая конкретному объекту (материальному объекту, системе, явлению или процессу).

Размер не зависит от выбора единиц измерений.

1000 мг; 1 г; 0,001 кг – три варианта представления одного и того же размера. Каждый из них является значением ФВ (в данном случае – массы) – выражением размера в тех или иных единицах измерений.

Значение физической величины – это выражение размера ФВ в виде некоторого числа принятых для нее единиц.

Значение физической величины Q можно представить в виде произведения (основное уравнение измерения):

$$Q=q [Q],$$

где q – отвлечённое число, называемое *числовым значением*,

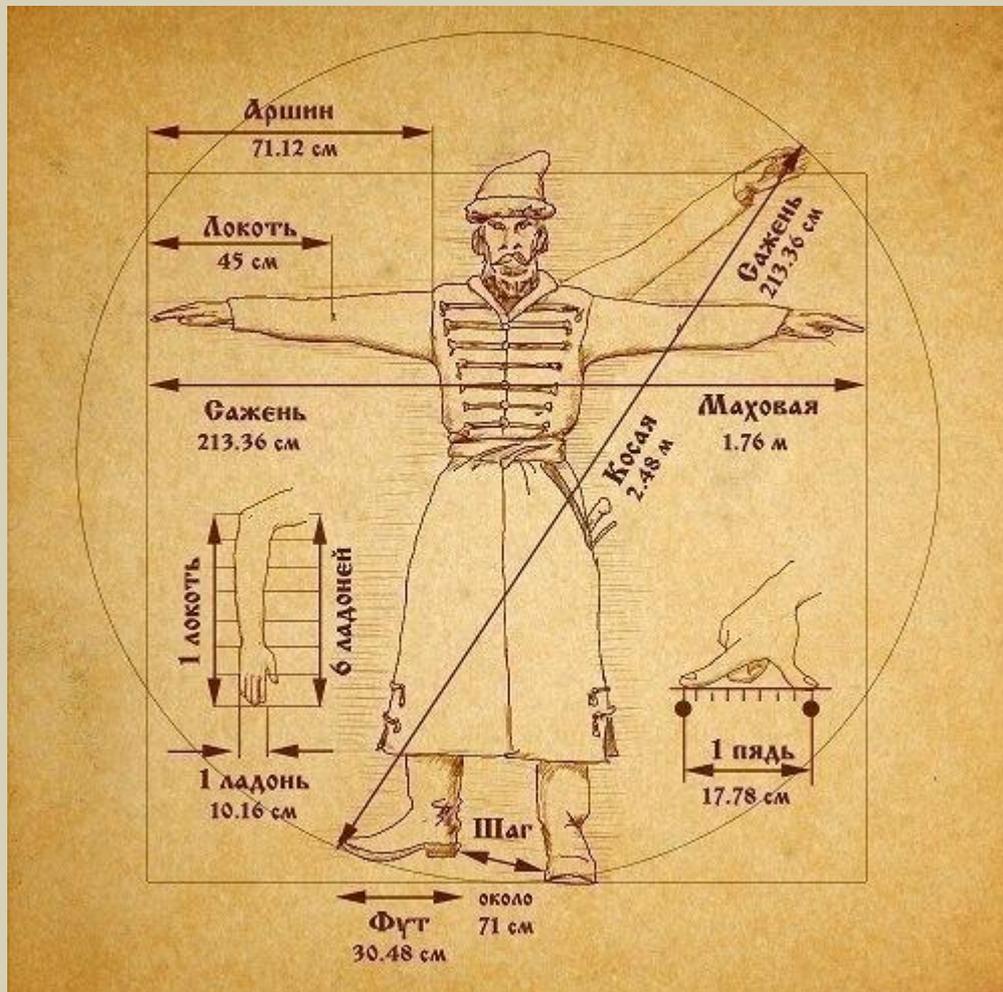
$[Q]$ – *размер единицы* измерения данной ФВ.

Из-за зависимости числовых значений от размеров единиц ФВ, роль последних очень велика. Если допустить произвол в выборе единиц, то результаты измерений будут несопоставимы между собой, т.е. нарушится **принцип единства измерений**. Чтобы этого не произошло, единицы измерений устанавливаются по определённым правилам и закрепляются **законодательным путём**.

Единица измерения ФВ – это ФВ фиксированного размера, которой условно присвоено числовое значение, равное единице, и применяемая для количественного выражения однородных с ней ФВ.

Размер единиц измерения ФВ устанавливается путем их **законодательно закреплённого определения** метрологическими органами государства.

Старорусская пядевая система мер



Обозначение	Соответствие	Величина	Наименование
\bar{h}		17,78 см.	Пядь
\bar{c}	$2 \bar{h}$	35,56 см.	Стопа
$\bar{л}$	$3 \bar{h}$	53,34 см.	Локоть
$\bar{а}$	$4 \bar{h}$	71,12 см.	Аршин
$\bar{ш}$	$5 \bar{h}$	88,90 см.	Шаг
$\bar{м}$	$6 \bar{h}$	106,68 см.	Мера, полсажени
\bar{o}	$7 \bar{h}$	124,46 см.	Лоб
\bar{i}	$8 \bar{h}$	142,24 см.	Столбец
$\bar{п}$	$9 \bar{h}$	160,02 см.	Посох
\bar{s}	$12 \bar{h}$	213,36 см.	Сажень
$\bar{\phi}$	$16 \bar{h}$	284,48 см.	Круг
$\bar{с}$	$17 \bar{h}$	302,26 см.	Косая сажень
$\bar{с}$	$24 \bar{h}$	426,72 см.	Мерная сажень

Системы физических величин и единиц. Система СИ

Обосновано, но в общем произвольным образом выбираются несколько ФВ, называемых **основными**. Остальные величины, называемые **производными**, выражаются через них на основе известных уравнений связи между ними.

Совокупность основных и производных единиц ФВ, образованная в соответствии с принятыми принципами, называется **системой единиц ФВ**. Единица основной ФВ в данной системе является **основной единицей системы**.

Действующая в настоящее время «Международная система единиц» (СИ (SI) «система интернациональная») была принята XI Генеральной конференцией по мерам и весам в 1960 г.

Система СИ состоит из 7 основных, 2 дополнительных и ряда производных единиц.

Основные и дополнительные единицы ФВ системы СИ

№п/ п	Физическая величина			Единицы измерения ФВ		
	наименование	размерность	Рекомендуемое обозначение	наименование	обозначение	
					Русское	международное
Основные						
1	Длина	L	l	Метр	М	М
2	Масса	M	m	Килограмм	Кг	Kg
3	Время	T	t	Секунда	С	S
4	Сила электрического тока	I	I	Ампер	А	А
5	Термодинамическая температура	Θ	T	Кельвин	К	К
6	Количество вещества	N	n, ν	Моль	Моль	Mol
7	Сила света	J	J	Кандела	Кд	Kd
Дополнительные						
8	Плоский угол	-	-	Радиан	Рад	Rad
9	Телесный угол	-	-	стерадиан	ср	sr

На территории РФ система единиц СИ действует с 1 января 1982 г. в соответствии с ГОСТ 8.417–81 «ГСИ. Единицы физических величин». Она является логическим развитием предшествовавших ей систем единиц СГС, МКГСС и др.

Производная единица системы единиц – это единица производной ФВ системы единиц, образованная в соответствии с уравнением, связывающим ее с основными единицами или же с основными и уже определенными производными единицами.

Производные единицы бывают когерентными и некогерентными.

Когерентной называется производная единица ФВ, связанная с другими единицами системы уравнением, в котором числовой коэффициент принят равным 1.

Производные единицы системы СИ, имеющие специальное название

Величина		Единица		
Наименование	Размерность	наименование	обозначение	Выражение через единицы СИ
Частота	T^{-1}	Герц	Гц	s^{-1}
Сила, вес	$LM T^{-2}$	Ньютон	Н	$mkg s^{-2}$
Давление, механическое напряжение	$L^{-1}MT^{-2}$	Паскаль	Па	$m^{-1}kg s^{-2}$
Энергия, работа, количество теплоты	L^2MT^{-2}	Джоуль	Дж	$m^2kg s^{-2}$
Мощность	L^2MT^{-3}	Ватт	Вт	$m^2kg s^{-3}$
Количество электричества	TI	Кулон	Кл	sA
Электрическое напряжение, потенциал, электродвижущая сила	$L^2MT^{-3}I^{-1}$	Вольт	В	$m^2kg s^{-3}A^{-1}$
Электрическая емкость	$L^{-2}M^{-1}T^4I^2$	Фарад	Ф	$m^{-2}kg^{-1}s^4A^2$
Электрическое сопротивление	$L^2M^{-3}T^{-2}$	Ом	Ом	$m^{-2}kg s^{-3}A^{-2}$
Электрическая проводимость	$L^{-2}M^{-1}T^3I^2$	Сименс	См	$m^{-2}kg^{-1}s^3A^2$
Поток магнитной индукции	$L^2MT^{-2}I^{-1}$	вебер	Вб	$m^2kg s^{-2}A^{-1}$

Производные единицы системы СИ, имеющие специальное название

Наименование	размерность	наименование	обозначение	Выражение через единицы СИ
Магнитная индукция	$MT^{-2}I^{-1}$	Тесла	Тл	$kg\,s^{-2}\,A^{-1}$
Индуктивность	$L^2MT^{-2}I^{-2}$	генри	Гн	$m^2kg\,s^{-2}\,A^{-2}$
Световой поток	J	Люмен	Лм	$cd\,sr$
Освещенность	$L^{-2}J$	Люкс	Лк	$m^{-2}cd\,sr$
Активность радионуклида	T^{-1}	Беккерель	Бк	s^{-1}
Поглощенная доза ионизирующего излучения	L^2T^{-2}	Грей	Гр	m^2s^{-2}
Эквивалентная доза излучения	L^2T^{-2}	Зиверт	Зв	m^2s^{-2}

Кратная единица – это единица ФВ, в целое число раз большая системной или вне системной единицы.

Дольная единица – это единица ФВ, в целое число раз меньшая системной или вне системной единицы.

Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц и их наименований

множитель	приставка	Обозначение приставки		множитель	приставка	Обозначение приставки	
		междуна родное	русское			Междуна родное	русское
10^{18}	экса	Э	Е	10 ⁻¹	Деци	d	д
10^{15}	Пета	П	Р	10 ⁻²	Сант	с	с
10^{12}	Тера	Т	Т	10 ⁻³	Милли	m	м
10^9	Гига	Г	G	10 ⁻⁶	Микро	μ	мк
10^6	Мега	М	M	10 ⁻⁹	Нано	n	н
10^3	Кило	к	k	10 ⁻¹²	Пико	p	п
10^2	Гек-то	г	g	10 ⁻¹⁵	Фемто	F	ф
10^1	Дека	да	da	10 ⁻¹⁸	атто	a	а

Система СИ

Единицы ФВ

системные

внесистемные

основные

производные

кратные

дольные

допускаемые наравне с
единицами СИ

допускаемые к
применению в
специальных областях

временно допускаемые
к применению наравне
с единицами СИ

изъятые из
употребления

Внесистемные единицы

(единицы ФВ, не входящие ни в одну из принятых систем единиц)

Внесистемные единицы разделяют на четыре вида:

- ▣ **Допускаемые наравне с единицами СИ**, например: единица массы – тонна; единицы плоского угла – градус, минута, секунда; единица объема – литр и др. Внесистемные единицы, допускаемые к применению наравне с единицами СИ, приведены в таблице 1.7.
- ▣ **Допускаемые к применению в специальных областях**, к которым относятся: единицы длины (в астрономии) – астрономическая единица, парсек, световой год; единица оптической силы (в оптике) – диоптрия; единица энергии (в физике) – электрон-вольт, приведены в таблице 1.4.
- ▣ **Временно допускаемые к применению наравне с единицами СИ**, например: в морской навигации – морская миля; в ювелирном деле единица массы – карат и др. Эти единицы должны изыматься из употребления в соответствии с международными соглашениями.
- ▣ **Изъятые из употребления**, к ним относятся единицы, применяемые в основном в быту и упоминаются в документах невысокого официального уровня.

Внесистемные единицы, допускаемые к применению наравне с единицами СИ

Наименование величины	Единица			Соотношение с единицей СИ
	наименование	Обозначение		
		Международное	Русское	
масса	Тонна	t	т	10^3 кг
	Атомная единица массы	u	а.е.м.	$\approx 1,66057 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
время	Минута	min	мин	60 с
	Час	h	ч	3600 с
	сутки	d	сут	86400 с
Плоский угол	Градус	\dots°	\dots°	$(\pi/180) \text{ рад} = 1,745329 \dots \cdot 10^{-2} \text{ рад}$
	Минута	\dots'	\dots'	$(\pi/10800) \text{ рад} = 2,908882 \dots \cdot 10^{-4} \text{ рад}$
	Секунда	\dots''	\dots''	$(\pi/648000) \text{ рад} = 4,848137 \dots \cdot 10^{-6} \text{ рад}$
	Град или гон	$\dots^{\text{Д}}$	град	$(\pi/200) \text{ рад}$
Объем, вместимость	Литр	l	л	10^{-2} м^3
длина	Астрономическая единица	ua	а.е.	$\approx 1,45598 \cdot 10^{11} \text{ м}$
	Световой год	ly	Св.год	$\approx 9,4605 \cdot 10^{15} \text{ м}$
	парсек	pc	пк	$\approx 3,0857 \cdot 10^{16} \text{ м}$

**Внесистемные единицы, изъятые из употребления,
и их связь с единицами системы СИ**

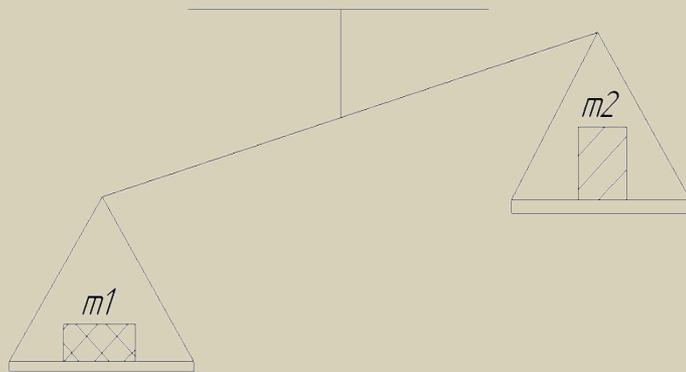
Наименование величины	Единица		
	Наименование	Обозначение	Соотношение с единицей СИ
Длина	Микрон Ангстрем	мк Å	1 мк= 10^{-6} м 1 Å= 10^{-10} м
Масса	Центнер	цн	1 цн= 10^2 кг
Площадь	Ар	а	1 а= 10^2 м ²
Угол поворота	Оборот	об	1 об=2 π рад
Угловая скорость	Оборот в минуту Оборот в секунду	об/мин об/с	1 об/мин=π/30 рад/с 1 об/с=2π рад/с
Сила	Килограмм-сила Тонна-сила Дина	кгс тс дин	1 кгс=9,80665 Н 1 тс=9,80665* 10^3 Н 1 дин= 10^{-5} Н
Работа и энергия	Килограмм-сила-метр Эрг Ватт-час	кгс*м эрг вт*ч	1 кгс*м=9,80665 Дж 1 эрг= 10^{-7} Дж 1 вт*ч =3,6* 10^3 Дж
Мощность	Лошадиная сила	Л.с.	1 л.с.=735,499 Вт
Давление	Бар Миллиметр ртутного столба Миллиметр водяного столба Техническая атмосфера Физическая атмосфера	бар мм рт. ст. мм вод. ст. ат атм	1 бар= 10^5 Па 1 мм рт. ст.=133,322 Па 1 мм вод. ст.=9,80665 Па 1 ат=9,80665* 10^4 Па 1 атм=1,01325* 10^5 Па (760 мм рт. ст.)

Способы извлечения измерительной информации

Измерение физической величины – это совокупность операций по применению технического средства, хранящего единицу физической величины, обеспечивающих нахождение соотношения (в явном или неявном виде) измеряемой величины с ее единицей и получение значения этой величины.

Суть измерения заключается в **сравнении**.

Измерение суть сравнение размеров опытным путем.
Вариантов сравнения между собой двух размеров всего три:



$$Q_i Q_j \quad (1)$$

$$Q_i - Q_j = \Delta Q_{ij} \quad (2)$$

$$\frac{Q_i}{Q_j} = x_{ij} \quad (3)$$

Три правила сравнения двух размеров

Измерение по правилу (1) позволяет ответить на вопрос: какой из двух размеров больше другого (либо они равны), но ничего не говорит о том, *на сколько больше*, или *во сколько раз*.

Измерение по правилу (2) позволяет получить ответ на вопрос о том, *на сколько* один размер больше или меньше другого (в частном случае они могут оказаться равными).

Измерение по правилу (3) представляет собой сравнение неизвестного размера $Q_i = Q$ с узаконенной единицей измерения $Q_j = [Q]$, с целью определения числового значения q измеряемой физической величины, которое показывает, *во сколько раз* неизвестный размер больше размера единицы, или на сколько единиц он больше нуля.

Измерительные шкалы

Шкала физической величины представляет собой упорядоченную совокупность значений этой величины, принятую по соглашению на основании результатов точных измерений.

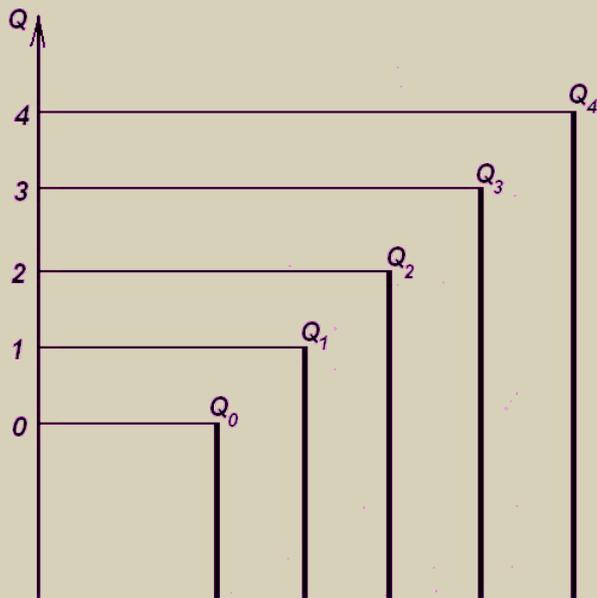


Неметрические шкалы

Шкала наименований (шкала классификации). Такие шкалы используются для классификации эмпирических объектов, свойства которых проявляются только в отношении эквивалентности (совпадения или несовпадения). Эти свойства нельзя считать физическими величинами, поэтому шкалы такого вида не являются шкалами физических величин. Это самый простой тип шкал, основанный на приписывании качественным свойствам объектов чисел, играющих роль имен. Примеры: в технических науках - целый класс измерений, осуществляемых системами обнаружения; классификация флоры, фауны, болезней, контроль изделий.

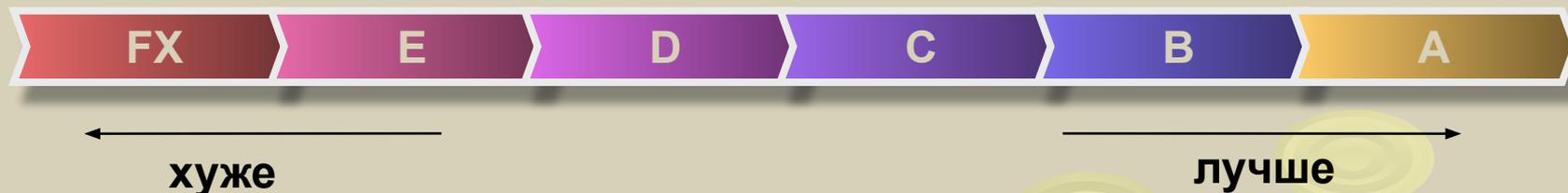
Шкала порядка (шкала рангов). Результат экспериментального решения неравенства (1) может быть представлен на *шкале порядка*, являющейся упорядоченной последовательностью опорных (*реперных*) точек, обозначаемых буквами, цифрами или символами и соответствующих размерам, $Q_0 < Q_1 < Q_2 < Q_3 \dots < Q_n$ о каждом из которых известно, что он больше предыдущего, но меньше последующего, хотя сами размеры неизвестны. Шкала является монотонно изменяющейся и позволяет установить отношение «больше – меньше» между величинами, характеризующими это свойство. Если для обозначения реперных точек используются цифры, то они называются *баллами*. Обозначения нельзя ни складывать, ни вычитать, ни делить, ни перемножать.

Шкала порядка



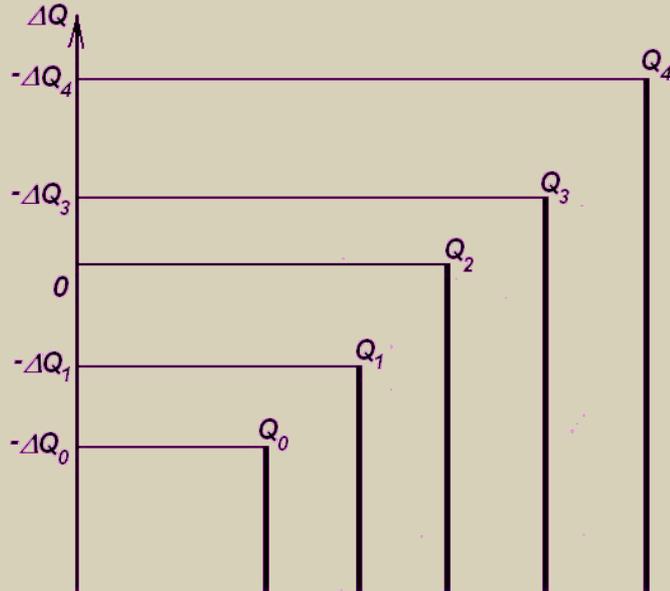
По шкалам порядка не только нельзя определить, чему равен измеряемый размер, но и невозможно сказать, на сколько (или во сколько раз) он больше или меньше размера. В шкалах порядка принципиально невозможно ввести единицы измерения, так как для них не установлено отношение пропорциональности. Хотя ноль может и существовать.

Пример: шкала оценок ECTS в ИТМО

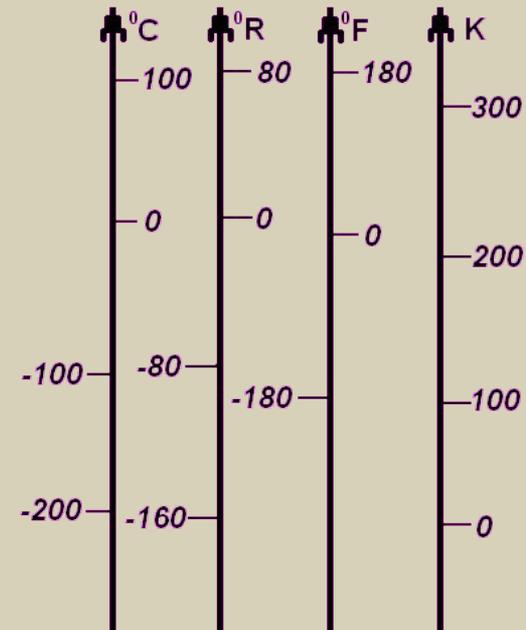


Метрические шкалы

Шкала интервалов (шкала разностей). Шкала состоит из одинаковых интервалов, имеет единицу измерения и произвольно выбранное начало – нулевую точку. На шкалах интервалов по сравнению с неметрическими шкалами установлен масштаб. Шкала интервалов представляет собой результат экспериментального сравнения i -го размера с j -м, проведенный по правилу (2). На рисунке приведен пример построения шкалы интервалов, где в качестве j -го размера выбран второй. Если бы для сравнения были выбраны третий или четвертый размеры, то нуль сместился бы выше по шкале интервалов; если бы первый или нулевой – ниже.

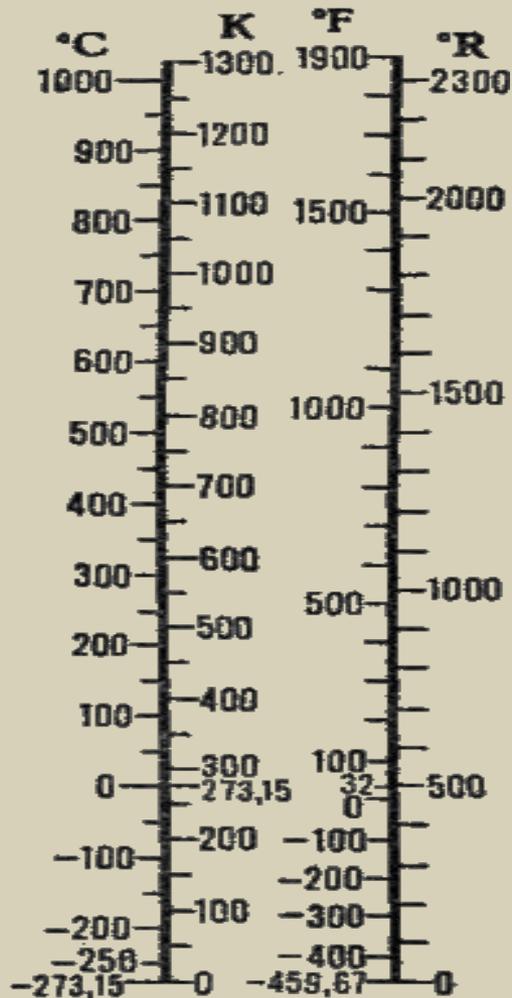


Построение шкалы интервалов



Температурные шкалы Цельсия ($^{\circ}\text{C}$), Реомюра ($^{\circ}\text{R}$), Фаренгейта ($^{\circ}\text{F}$) и Кельвина ($^{\circ}\text{K}$)

Шкала интервалов



Перевод одной шкалы интервалов $Q=Q_{01}+q_1[Q]_1$ в другую $Q=Q_{02}+q_2[Q]_2$ проводится по формуле:

$$q_2 = \frac{(q_1 - (Q_{02} - Q_{01})/[Q]_1)[Q]_1}{[Q]_2}$$

$$t^{\circ}\text{C} = 5/9(h^{\circ}\text{F} - 32)$$

$$h^{\circ}\text{F} = 9/5 t^{\circ}\text{C} + 32$$

$$n^{\circ} \quad K = (n + 273,15)^{\circ}$$

$$C = [1,8 \cdot (n + 273,15) + 32]^{\circ} F$$

Шкала отношений. Шкала отношений служит для представления результатов измерений, полученных посредством экспериментального сравнения i -го размера с j -м по правилу (3). Они описываются уравнением $Q = q[Q]$, где Q – физическая величина, для которой строится шкала, $[Q]$ – ее единица измерения, q – числовое значение физической величины.

На шкалах отношений определены любые математические операции. Переход от одной шкалы отношений к другой происходит в соответствии с уравнением:

$$q_2 = \frac{q_1[Q]_1}{[Q]_2}$$

Абсолютные шкалы. Абсолютные шкалы обладают всеми признаками шкал отношений, но дополнительно имеют естественное однозначное определение единицы измерения и соответственно не зависят от принятой системы единиц измерения.

Абсолютная шкала может использоваться для измерения *относительных величин*. Действительно, такие величины, как коэффициент усиления или затухания, коэффициент трения, коэффициент полезного действия, добротность колебательной системы, вероятность, относительная частота появления события в серии испытаний и т. п., выражаются отвлеченными числами, не зависящими от выбора единиц, а при измерении этих величин не требуется эталонов.