

2.7. Единицы измерения и размерности физических величин

Изучение физики, исследование физических явлений и закономерностей, выполнение лабораторных работ связано с измерением физических величин.

Физической величиной называют свойство, общее в качественном смысле для многих физических объектов (физических систем, их состояний и процессов, которые происходят в этих системах), но количественно индивидуальное (разное) для каждого объекта. Физическими величинами являются, например, масса, энергия, температура, электрический заряд, плотность, показатель преломления и др. Все физические тела, все частицы вещества, кванты электромагнитного поля имеют массу. Массы всех физических объектов качественно одинаковы: они характеризуют инертные и гравитационные свойства этих объектов. Но количественно масса каждого объекта – свойство индивидуальное: масса одного объекта может быть больше или меньше в определенное количество раз массы другого объекта. Например, масса протона приблизительно в 1836 раз больше массы электрона.

Конкретные проявления одной и той же физической величины (например, массы) называются *однородными величинами*, которые отличаются друг от друга размерами. *Значение физической величины* – это количественное содержание в данном объекте свойства, соответствующего понятию «физическая величина».

Для сравнения размеров однородных величин вводится значение физической величины. *Истинное значение физической величины* – это значение, которое идеально отображало бы качественно и количественно соответствующее свойство объекта. *Действительное значение физической величины* – это значение, найденное экспериментальным путем и настолько приближенное к истинному значению, что может быть использовано вместо него. Нахождение действительного значения физической величины называется *измерением* и выполняется с помощью специальных технических средств (*средств измерения*).

Между физическими величинами существуют связи и зависимости, которые выражаются с помощью математических соотношений. Такие связи имеют реально объективный характер и могут:

- выражать фундаментальные законы природы, например закон всемирного тяготения:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2};$$

- задавать некоторую физическую величину, например плотность однородного тела:

$$\rho = \frac{m}{V};$$

- показывать установленную экспериментально или теоретически связь между несколькими физическими величинами, например уравнение состояния идеального газа:

$$pV = \frac{m}{M} RT.$$

Совокупность физических величин, связанных между собой зависимостями, называют *системой физических величин*. Эта система состоит из *основных величин*, которые условно приняты в качестве независимых, и *производных величин*, которые выражаются через основные (или через другие производные) величины системы с помощью уравнений.

Количество основных величин системы может быть любым, однако, чтобы система была наиболее удобной, оно должно быть определенным. Например, система механических величин может быть построена на трех основных величинах, система величин молекулярной физики – на пяти, а система величин, которая охватывает все разделы физики, – на семи основных величинах.

Основным величинам системы присваивается символ в виде прописной буквы латинского или греческого алфавита. Этот символ называется *размерностью основной физической величины*.

Размерностью производной физической величины называется выражающее связь данной величины с основными величинами системы математическое соотношение, в котором коэффициент пропорциональности принят равным единице.

Размерность физической величины X обозначается символом $\dim X$ (от англ. dimension – размер, размерность). Например, размерность скорости $\dim v = LT^{-1}$, размерность силы $\dim F = LMT^{-2}$.

Для размерности любой физической величины можно записать общее выражение

$$\dim X = L^{\alpha} M^{\beta} T^{\gamma} I^{\delta} \Theta^{\epsilon} N^{\nu} J^{\mu},$$

где учтено, что система из семи основных физических величин дает возможность выразить производную физическую величину, которая имеет отношение к любому разделу физики.

Если все показатели степенной размерности некоторой производной физической величины равны нулю, то такая величина называется *безразмерной*. Безразмерными являются все относительные величины, например относительное удлинение, относительная диэлектрическая проницаемость и др. Если хотя бы один из показателей степенной размерности некоторой физической величины не равен нулю, то такая величина будет *размерной*. Понятно, что размерности одной и той же физической величины в разных системах величин могут быть разными, поэтому размерность производной физической величины является ее относительной характеристикой, которая зависит от выбора системы величин.

Использование размерности позволяет определить, как изменяется размер производной величины при изменении размеров основных величин. Например, размерность момента инерции $\dim I = L^2 M$. Пусть линейные размеры тела увеличились в 3 раза, а масса уменьшилась в 2 раза, тогда

$$\frac{I'}{I} = \left(\frac{l'}{l}\right)^2 \frac{m'}{m} = 3^2 \cdot \frac{1}{2} = 4,5.$$

Таким образом, момент инерции увеличился в 4,5 раза. С помощью размерностей физических величин можно также выяснить соотношения единиц в разных системах.

Знание размерностей основных и производных физических величин позволяет находить ошибки при решении физических задач. Если при решении задачи искомая величина получена в результате громоздких математических расчетов, то обязательно нужно проверить, совпадают ли размерности левой и правой частей полученного выражения. Если размерности не совпадают, то или в исходной части задачи, или в ее решении допущены ошибки.

В ряде случаев, когда известно, какие физические величины будут использованы при экспериментальном определении искомой величины, можно путем сопоставления размерностей выявить характер зависимости между этими величинами. Метод анализа размерностей применяется в тех случаях, когда

нахождение искомой величины требует или сложных математических расчетов, или знания механизма процесса, протекание которого заранее неизвестно.

В процессе производственной, научной и учебной деятельности человек все время сталкивается с необходимостью измерения разных физических величин. Измерение можно выполнять только в том случае, когда для каждой из этих физических величин выбраны соответствующие единицы.

Единица физической величины – это физическая величина, которой, согласно определению, присвоено числовое значение, равное единице. Необходимость измерения величин разных размеров приводит к использованию нескольких единиц, которые отличаются друг от друга размерами. Например, единицы длины – метр, парсек, сантиметр и микрометр – различаются размерами: $1 \text{ пк} = 3,0857 \cdot 10^{16} \text{ м}$, $1 \text{ см} = 10^{-2} \text{ м}$, $1 \text{ мкм} = 10^{-6} \text{ м}$.

Системой единиц физических величин называется совокупность основных и производных единиц с некоторой системой величин, образованных в соответствии с принятыми принципами.

2.8. Международная система единиц

Большое количество систем единиц физических величин, а также внесистемных единиц, которыми пользовались в разных странах, осложняло экономические связи между государствами, поэтому еще в начале XIX в. был поставлен вопрос о создании единой международной системы единиц.

В 1948 г. Международный союз чистой и прикладной физики представил на IX Генеральную конференцию по мерам и весам (ГКМВ) предложение о принятии *Международной практической системы единиц* с основными единицами – метр, килограмм, секунда и одной единицей Абсолютной практической системы электрических единиц.

В 1960 г. XI ГКМВ приняла решение о создании *Международной системы единиц*, которой было присвоено международное сокращенное наименование SI (Système International – международная система), или в русской транскрипции – СИ*. Международная система единиц состоит из семи основных единиц и двух дополнительных. Название, размерность, обозначение и определение этих единиц приведены в табл. 2.1 и 2.2. В нашей республике Международная система единиц введена с 1 января 1963 г.

* СИ читается и произносится раздельно: «ЭС – И», а не вместе: «СИ».

Таблица 2.1. Основные единицы СИ

Величина		Единица				Определение
Наименование	Размерность	Наименование	Обозначение			
			международное	русское		
Длина	L	метр	m	м	Метр — расстояние, которое проходит свет в вакууме за $1/299792458$ -ю долю секунды	
Масса	M	килограмм	kg	кг	Килограмм равен массе международного прототипа килограмма	
Время	T	секунда	s	с	Секунда равна 9 192 631 770 периодам электромагнитного излучения, соответствующего переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия-133	
Сила электрического тока	I	ампер	A	А	Ампер равен силе неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малой площади кругового поперечного сечения, расположенным в вакууме на расстоянии 1 м один от другого, вызвал бы на каждом участке проводника длиной 1 м силу взаимодействия, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н	
Термодинамическая температура	Θ	кельвин	K	К	Кельвин равен $1/273,16$ части термодинамической температуры тройной точки воды	

Количество вещества	N	моль	mol	моль	Моль равен количеству вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде-12 массой 0,012 кг. При применении моля структурные элементы должны быть специфицированы и могут быть атомами, молекулами, электронами, ионами
Сила света	J	кандела	cd	кд	Кандела равна силе света, испускаемого с поверхности площадью $1/600000$ м ² полного излучателя в перпендикулярном направлении при температуре излучателя, равной температуре затвердевания платины при давлении 101 325 Па

Таблица 2.2. Дополнительные единицы СИ

Величина	Единицы			Определение
	Наименование	Обозначение		
		международное	русское	
Плоский угол	радиан	rad	рад	Радиан равен углу между радиусами окружности, длина дуги между которыми равна радиусу
Телесный угол	стерадиан	sr	ср	Стерадиан равен телесному углу с вершиной в центре сферы, который вырезает на поверхности сферы площадь, равную площади квадрата со стороной, равной радиусу сферы

Применение Международной системы единиц во многих странах показало ее неоспоримые преимущества перед другими системами единиц, поэтому в 1978 г. Постоянная комиссия СЭВ по стандартизации утвердила стандарт «*Метрология. Единицы физических величин*», основой которого стала Международная система единиц. Стандарт устанавливает единицы физических величин, а также наименования, обозначения и правила их применения. Этот стандарт по настоящее время используется в Республике Беларусь.

Отметим некоторые наиболее отличительные особенности стандарта СЭВ.

1. Обязательно применение единиц Международной системы единиц SI (СИ), а также десятичных кратных и дольных единиц от них.

Стандарт не распространяется на единицы, применяемые в научных исследованиях и публикациях теоретического характера в области естествознания, а также на единицы величин, оцениваемых по условным шкалам (например, шкалам светочувствительности фотоматериалов).

2. Стандарт разрешает использовать наравне с единицами СИ без ограничения срока девять *внесистемных единиц*: тонну – для массы; минуту, час, сутки – для времени; угловые градус, минуту, секунду – для плоского угла; литр – для объема и вместимости; градус Цельсия – для температуры и разности температур.

В специальных областях разрешается использовать наряду с единицами СИ без ограничения срока десять *внесистемных единиц*: астрономическую единицу, световой год и парсек – в астрономии; атомную единицу массы – в атомной физике; гектар – в сельском и лесном хозяйствах; диоптрию – в оптике; град (гон) – в геодезии; электронвольт – в физике; вольт-ампер и вар – в электротехнике.

Разрешается применять четыре *относительные единицы* (единица, процент, промилле, миллионная доля) и пять *логарифмических единиц* (бел, децибел, октава, декада, фон).

3. Учебный процесс (включая учебники и учебные пособия) во всех учебных заведениях должен быть основан на применении единиц СИ и единиц, допускаемых к применению.

4. В таблицах и тексте стандарта на первом месте приводятся международные обозначения единиц, а на втором – русские обозначения с указанием, что русские обозначения единиц даны для информации и применения в необходимых случаях.

5. Не допускаются обозначения единиц физических величин, отличающиеся от международных или русских обозначений.

2.9. Эталоны основных единиц СИ в механике

Эталон (франц. *étalon* – образец, мерило) – измерительное устройство, предназначенное и утвержденное для воспроизведения и (или) хранения единицы измерений средствами измерений. Эталоны призваны обеспечивать единство измерений в той или иной области науки, а также в других областях деятельности человека.

Различают *первичные, вторичные и рабочие эталоны*. Первичные эталоны предназначены для передачи шкалы и (или) размера единицы измерений вторичным и рабочим эталонам, а также уникальным и высокоточным средствам измерений, а *вторичные эталоны* являются промежуточными между первичными и рабочими эталонами.

При разработке конкретных эталонов используются атомные и квантовые явления, фундаментальные физические константы (ФФК), фундаментальные физические принципы.

Эталон единицы длины – метра. Шкала длин (расстояний) является шкалой интервалов. Ее особенность – отсутствие единого фиксированного в пространстве нуля отсчета. Измеряются всегда только интервалы протяженности – расстояния. Условный перемещаемый в пространстве нуль средства измерения длины (нуль шкалы отсчетного устройства) при измерении совмещается с некоторой точкой измеряемого объекта.

В табл. 2.3 приведены все существовавшие определения метра.

Таблица 2.3. Определения метра

Определение	Год принятия
Одна десятиmillionная часть четверти Парижского меридиана	1791
Длина «архивного метра» (платинового стержня, изготовленного в 1799 г.)	1872
Расстояние между штрихами на X-образной платино-иридиевой линейке (международном прототипе)	1889
1650763,73 длины волны в вакууме излучения, соответствующего переходу между уровнями 2p ₁₀ и 5d ₅ атома криптона-86	1960
Длина пути, проходимого светом в вакууме за 1/299792458-ю долю секунды	1983

Эталоны единицы массы – килограмма. Шкала масс – аддитивная шкала отношений.

Международный прототип эталона массы хранится в Международном бюро мер и весов (МБМВ, Париж).

Определение килограмма не связано с ФФК или другими основными единицами СИ (табл. 2.4). Международный прототип, безусловно, подвержен износу, степень которого определить принципиально невозможно, поэтому поиск путей создания эталона килограмма, опирающегося на ФФК или атомные константы, – важная проблема метрологии.

Таблица 2.4. Определения килограмма

Определение	Год принятия
Масса 1 дм ³ воды при температуре ее максимальной плотности	1791
Масса «архивного килограмма» (платиновой цилиндрической гири, изготовленной в 1799 г.)	1872
Масса международного прототипа – платиново-иридиевой гири высотой и диаметром 39 мм, равная массе «архивного килограмма»	1889

Теоретически эталоном килограмма мог бы служить идеальный кристалл, содержащий известное число атомов определенного химического элемента, но способов выращивания такого кристалла пока нет.

Эталон единицы времени (длительности) – секунды. Шкала времени – типичная шкала разностей (интервалов). Секунда, как и шкала счета времени, занимает особое место среди других основных единиц СИ. Прежде всего необратимость времени – одна из фундаментальных характеристик нашей Вселенной. Кроме того, существует стремление выразить через ФФК и секунду (или герц) другие единицы СИ.

В метрическую систему 1791 г. секунда не входила, измерение времени считалось задачей астрономов, а не метрологов. В последующие системы секунда была включена как основная единица, ее размер одинаков во всех системах. Определение секунды, однако, трижды менялось (табл. 2.5).

Национальные эталоны времени имеют в своем составе цезиевые реперы (хранители), т.е. воспроизводят размер секунды в соответствии с ее определением.

Таблица 2.5. Определения секунды

Определение	Год принятия
1/86400 часть средних солнечных суток	С момента организации регулярных астрономических наблюдений
1/31556925,9147 часть тропического года для 1900.00 января в 12 часов эфемеридного времени, что соответствует 12 часам 31 декабря 1899 г.	1960
Интервал, в течение которого совершается 9 192 631 770 периодов излучения, соответствующего переходу между уровнями сверхтонкой структуры основного состояния атома цезия-133 в отсутствие возмущения полями	1967

Эталон времени не только воспроизводит размер секунды, но и ведет шкалу текущего времени – равномерного атомного времени, привязанную к Григорианскому солнечному календарю, которым пользуется большинство стран. В связи с этим эталоны времени функционируют непрерывно (в отличие от других эталонов). Относительная погрешность лучших национальных эталонов времени лежит в пределах $2 \cdot 10^{-13} - 5 \cdot 10^{-14}$. Эталоны времени – самые точные из всех эталонов шкал и единиц измерений.

Вопросы и задания для самостоятельной работы

1. Что называют физической величиной? Какое содержание заключает в себе физическая величина в качественном смысле? В чем проявляется количественная индивидуальность физической величины? Приведите примеры.
2. Что означает термин «измерение физической величины»? Что называют значением физической величины? Что называют единицей физической величины?
3. В чем заключается различие действительного и истинного значений физической величины? Приведите примеры.
4. Что называют системой физических величин? Сформулируйте определения основных и производных единиц системы физических величин.
5. Что называется размерностью основных и производных физических величин? Как обозначается размерность физической величины? Запишите общее выражение для размерности любой