

Лекция №6 Границы применимости классической механики. Единицы измерения и размерности физических величин. Международная система единиц (СИ). Эталоны массы, длины, времени.

Л-1: 2.6; 5.6

Механика Галилея–Ньютона, которая получила название *классической*, является хорошим приближением к действительности для макроскопических тел, движущихся со скоростями, малыми по сравнению со скоростью света. *Макроскопическими* называют окружающие нас тела, которые состоят из большого количества молекул или атомов. Поскольку скорость света чрезвычайно велика ($c = 3 \cdot 10^8$ м/с), то классическая механика применима к преобладающему большинству объектов и явлений, окружающих человека. Значительные отклонения имеют место только при очень больших скоростях, практически недостижимых для макроскопических тел в земных условиях. Так, даже при космических скоростях около 30 км/с классический закон сложения скоростей дает относительную ошибку 10^{-8} , что намного меньше, чем погрешность большинства современных методов измерения скорости.

С развитием физики, в частности оптики и электродинамики, возник вопрос о распространении принципа относительности на немеханические явления. К началу XX в. в физике сложилась своеобразная ситуация, когда многочисленные эксперименты, с одной стороны, подтверждали справедливость принципа относительности для всех физических явлений, с другой – показывали в ряде случаев ошибочность преобразований Галилея.

Справедливость преобразований Галилея может быть проверена экспериментально путем сравнения вытекающих из них результатов. Проверка одного из важнейших результатов – формулы сложения скоростей – показала ошибочность ее при скоростях, близких к скорости света. В опытах А. Физо (1851), А. Майкельсона и Э. Морли (1887) было установлено, что скорость света не зависит от скорости движения источника и наблюдателя, т. е. остается постоянной

в любых системах отсчета. Все попытки объяснить результаты этих экспериментов в рамках классической механики оказались неудовлетворительными.

В 1905 г. выдающийся физик-теоретик, один из создателей современной физики Альберт Эйнштейн (1879–1955), исследовал вопрос о том, какие изменения нужно внести в классическую механику, чтобы объединить уравнения электродинамики с принципом относительности. Ему пришлось пересмотреть господствовавшие в то время представления об абсолютном пространстве и времени и отказаться от утверждения о неизменности расстояний и промежутков времени в разных системах отсчета. Новое учение о пространстве и времени получило название *специальной теории относительности* (СТО). В качестве исходных позиций своей теории Эйнштейн принял два постулата.

Первый постулат переносит принцип относительности Галилея на любые физические процессы: все физические явления протекают одинаково во всех инерциальных системах отсчета. Все законы природы и уравнения, описывающие их, инвариантны при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой. Иначе говоря, все инерциальные системы отсчета по своим физическим свойствам эквивалентны. Никакими опытами нельзя ни одной из них отдать предпочтение перед другими.

Второй постулат утверждает, что скорость света c в вакууме не зависит от движения источника и приемника света и одинакова во всех направлениях. Это означает, что в отличие от всех иных скоростей, которые изменяются при переходе от одной системы отсчета к другой, скорость света в вакууме одинакова во всех инерциальных системах отсчета, т.е. является инвариантной величиной.

Из постулатов Эйнштейна следует, что скорость света c является предельной, никакой сигнал или воздействие не могут распространяться с большей скоростью. Этим отрицается принцип дальнего действия классической механики.

Из данных постулатов следуют преобразования физических величин при переходе от одной системы отсчета к другой и вся специальная теория относительности. Очевидно, что эти преобразования должны отличаться от преобразований Галилея, иначе скорость света не останется постоянной. В то же время

они должны переходить в преобразования Галилея при скоростях, малых по сравнению со скоростью света c .

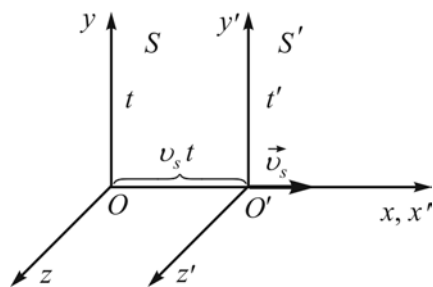


Рис. 6.1

Исходя из постулатов Эйнштейна, можно получить преобразования для координат и времени при переходе от неподвижной инерциальной системы S к инерциальной системе S' , движущейся поступательно с постоянной скоростью \vec{v}_s (рис. 6.1). Эти формулы, связывающие между собой пространственные координаты и

моменты времени одного и того же события в двух различных инерциальных системах отсчета, были получены ранее (в 1904 г.) нидерландским физиком-теоретиком Хендриком Лоренцем (1853–1928). Они называются *преобразованиями Лоренца*:

$$x' = \frac{x - v_s t}{\sqrt{1 - \beta^2}}; \quad y' = y; \quad z' = z; \quad t' = \frac{t - \frac{v_s x}{c^2}}{\sqrt{1 - \beta^2}},$$

$$x = \frac{x' + v_s t'}{\sqrt{1 - \beta^2}}; \quad y = y'; \quad z = z'; \quad t = \frac{t' + \frac{v_s x'}{c^2}}{\sqrt{1 - \beta^2}},$$

где $\beta = v_s/c$.

Импульс тела в релятивистской механике

$$\vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - \beta^2}}.$$

Тогда второй закон Ньютона в релятивистской форме имеет вид:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - \beta^2}} \right) = \vec{F}.$$

Даже при скоростях, с которыми движутся современные реактивные самолеты и ракеты, отклонения от законов классической механики оказываются настолько незначительными, что их практически невозможно измерить.

Полная релятивистская энергия тела равна

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1-\beta^2}}.$$

Если тело находится в состоянии покоя ($v = 0$), то $E_0 = mc^2$.

Масса в СТО выступает, таким образом, в качестве меры полной энергии тела. Данная формула показывает на принципиальную возможность перехода энергии, связанной с веществом, в энергию, связанную с излучением, и наоборот. При этом выполняется закон сохранения полной энергии. Классическим примером такого перехода является аннигиляция электрона и позитрона, в результате которой они перестают существовать, преобразуясь в электромагнитное излучение.

Законы классической механики перестают быть справедливыми также при рассмотрении движения так называемых *микроскопических* тел, т.е. отдельных атомов или элементарных частиц. Законы движения микроскопических тел устанавливаются квантовой механикой.

В классической механике состояние частицы в любой момент времени характеризуется ее координатами и скоростью \vec{v} (или импульсом $\vec{p} = m\vec{v}$). Абстрактным образом частицы является точка, описывающая непрерывную траекторию. В микромире такой подход неприменим. Эксперименты, например по дифракции электронов, убеждают нас, что микрочастицы проявляют свойства, характерные для волновых процессов. Согласно квантовой механике состояние частицы в каждый момент времени нельзя характеризовать точными значениями ее координат и импульса. Чем с меньшей неопределенностью Δx найдена координата частицы x , тем с большей неопределенностью Δp_x можно одновременно определить сопряженную ей координату p_x импульса \vec{p} . Между неопределенностями Δx и Δp установлено соотношение, называемое *соотношением неопределенности*

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2},$$

где $\hbar = h/(2\pi)$, $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка.

Соотношение неопределенности устанавливает границы применимости классической механики. Вследствие малости постоянной Планка неопределенности проявляются только для элементарных частиц. Если, например, неопределенность координаты пылинки массой 10^{-6} г равна $\Delta x \approx 10^{-10}$ м, то неопределенность скорости будет весьма незначительной: $\Delta v \approx 10^{-14}$ м/с. Поскольку координату и скорость этой очень малой пылинки можно измерить достаточно точно, то можно считать, что ее движение подчиняется законам классической механики. Движение электрона в атоме подчиняется законам квантовой механики. В самом деле, даже при неопределенности положения электрона порядка величины атома $\Delta x \approx 10^{-10}$ м получим неопределенность скорости порядка $7 \cdot 10^6$ м/с, которая сравнима со скоростью электрона в атоме.

Релятивистская и квантовая механики являются более общими теориями, чем классическая механика Ньютона, содержащаяся в них как приближенный предельный случай. Релятивистская механика переходит в классическую в случае медленных движений. Это означает, что формулы и соотношения релятивистской механики переходят в соответствующие формулы и соотношения классической механики при $v/c \ll 1$. Аналогично квантовая механика переходит в классическую в случае макроскопических тел (при $\hbar \rightarrow 0$).

Оба приведенных примера являются частными случаями так называемого «принципа соответствия», из которого следует, что каждая более точная теория содержит в себе менее точную и существует предельный переход, позволяющий получить формулы и соотношения менее точной (приближенной) теории из более точной (общей).

Развитие науки показало, что механика Ньютона не утратила своего значения. Для обычных движений окружающих нас макроскопических тел квантовые и релятивистские эффекты настолько невелики, что не выходят за границы точности самых тонких физических измерений. Таким образом, классическая механика Ньютона имеет весьма широкую и практически важную сферу применения, в границах которой она никогда не потеряет своего научного и практического значения.

Изучение физики, исследование физических явлений и закономерностей, выполнение лабораторных работ связаны с измерением физических величин. *Физической величиной* называют свойство, общее в качественном смысле для многих физических объектов, но количественно индивидуальное (разное) для каждого объекта (физических систем, их состояний и процессов, которые происходят в этих системах).

Конкретные проявления одной и той же физической величины (например, массы) называются *однородными величинами*, которые отличаются друг от друга размерами. *Размер 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

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

- а также 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.

Число 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 алфавитов. Этот символ называется *размерностью основной физической величины*.

Размерностью производной физической величины называется математическое соотношение, выражающее связь данной величины с основными величинами системы, 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

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

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 0, 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.

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 ве-*

личины – это физическая величина, которой согласно определению присвоено численное 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 – отличаются 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.

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 ст. был поставлен вопрос о создании единиц 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 (system Internationale – международная система) или в русской транскрипции – СИ. В нашей республике Международная система единиц введена с 1 января 1963 г.

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 применения этих единиц. Этот стандарт по настоящее время используется в Республике Беларусь.

Отметим некоторые наиболее отличительные особенности стандарта СЭВ:

1. Обязательность применения единиц Международной системы единиц (СИ, 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* (единицу, процент, промилле, миллионную долю) и пять *логарифмических единиц* (бел, децибел, октаву, декаду, 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 приводятся на первом месте международные обозначения единиц, а на втором – русские обозначения с указанием, что русские обозначения единиц приведены для информации и применения в необходимых случаях.

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

Табл. 1. Основные единицы СИ

Величина		Единица			
Название	Размерность	Название	Обозначение		Определение
			Международное	русское	
Длина	L	метр	m	м	Метр – расстояние, которое проходит свет в вакууме за $1/299\,792\,458$ -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	A	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 рас-

					стоянии 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	K	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 $1/600\,000$ м ² полного излучателя в перпендикулярном направлении при температуре излучателя, равной температуре затвердения платины при давлении 101 325 Па

Табл. 2. Дополнительные единицы СИ

Величина	Единицы			
	Название	Обозначение		Определение
		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