Тесты кафедры анатомии человека МГМСУ им. А.И. Евдокимова

Конспект лекций
по физике (для бакалавриата всех профилей)
ЧАСТЬ I. Механика
Тема 1. Кинематика поступательного и вращательного движения
Кинематика поступательного движения.
Положение материальной точки А в декартовой системе координат в данный момент времени определяется тремя координатами x, y и z или радиусом-вектором - вектором, проведенным из начала системы координат в данную точку (рис. 1).
Движение материальной точки определяется в скалярном виде кинематическими уравнениями: x = x(t), y = y(t), z = z(t), или в векторном виде уравнением:
Траектория движения материальной точки - линия, описываемая этой точкой при её движении в пространстве. В зависимости от формы траектории движение может быть прямолинейным или криволинейным.
Материальная точка, двигаясь по произвольной траектории, за малый промежуток времени t переместиться из положения А в положение В, пройдя при этом путь s, равный длине участка траектории АВ (рис. 2).Рис. 1Рис. 2
Вектор , проведенный из начального положения движущейся точки в момент времени t в конечное положение точки в момент времени (t+t), называется перемещением, то есть
.
Вектором средней скорости называется отношение перемещения к промежутку времени t , за который это перемещение произошло:
Направление вектора средней скорости совпадает с направлением вектора перемещения .
Мгновенной скоростью (скоростью движения в момент времени t называется предел отношения перемещения к промежутку времени t, за который это перемещение произошло, при стремлении t к нулю:
где - первая производная от функции по времени t, которую принято обозначать также в виде .
Вектор мгновенной скорости направлен по касательной, проведенной в данной точке к траектории в сторону движения. При стремлении промежутка времени t к нулю модуль вектора перемещения стремится к величине пути s, поэтому модуль вектора может быть определен через путь s:
Если скорость движения точки со временем изменяется, то быстрота изменения скорости движения точки характеризуется ускорением.
Средним ускорением в интервале времени от t до (t + t) называется векторная величина, равная отношению изменения скорости () к промежутку времени t, за который это изменение произошло:

Мгновенным ускорением или ускорением движения точки в момент времени t называется предел отношения изменения скорости к промежутку времени t, за который это изменение произошло, при стремлении t к нулю:
где - первая производная от функции по времени t,
 - вторая производная от функции по времени t.
Эти производные принято обозначать соответственно в виде: и .
Вектор ускорения может быть разложен на две составляющие: тангенциальную и нормальную , то есть:
Тангенциальная составляющая определяет быстроту изменения модуля скорости :
Вектор направлен по касательной к траектории движения и для ускоренного движения совпадает с направлением вектора скорости , а для замедленного движения - противоположен вектору скорости .
Нормальная составляющая определяет быстроту изменения направления скорости :
где r - радиус кривизны траектории движения.
Вектор направлен по нормали к траектории движения к центру ее кривизны (поэтому нормальную составляющую ускорения называют также центростремительным ускорением).
Кинематика вращательного движения
Пусть некоторая точка движется по окружности радиуса r. Изменение положения точки в пространстве за промежуток времени t определяется углом поворота (рис. 3). Элементарный поворот на угол можно рассматривать как вектор . Модуль вектора равен углу поворота, а его направление совпадает с направлением поступательного движения острия правого винта, головка которого вращается в направлении движения точки по окружности, т.е. подчиняется правилу правого винта.Рис. 3
Угловой скоростью называется векторная величина, равная пределу отношения угла поворота к промежутку времени t, за который этот поворот произошел, при стремлении t к нулю:
где - первая производная от функции угла поворота радиус-вектора по времени t.
Эту производную принято обозначать, как .
Вектор направлен вдоль оси вращения в соответствии с правилом правого винта (рис. 3).
Угловым ускорением называется векторная величина, равная пределу отношения изменения угловой скорости к промежутку времени t, за который это изменение произошло, при стремлении t к нулю:
где - первая производная от функции по времени t,
 - вторая производная от функции по времени t.
Эти производные принято обозначать соответственно в виде: и .
Вектор углового ускорения направлен вдоль оси вращения в сторону вектора элементарного приращения угловой скорости. При ускоренном вращении направление вектора совпадает с направлением вектора угловой скорости , а при замедленном - противоположно ему.
Кинематические параметры поступательного и вращательного движения связаны

между собой. Связь скорости и угловой скорости (см. рис. 3) определяется следующим образом:
В векторном виде эту связь для векторов и можно записать с помощью векторного произведения:
Ускорение а также можно выразить через угловые параметры, разложив ускорение а на две составляющие и , то есть: .
Тангенциальная составляющая выражается через угловое ускорение :
а нормальная составляющая - через угловую скорость :
Тогда ускорение:
При равномерном вращении угловая скорость не изменяется. В этом случае вращение можно характеризовать периодом вращения Т , то есть временем, за которое точка совершает один полный оборот.
Угловая скорость равномерного вращения связана с периодом вращения:
Частотой вращения n называется число полных оборотов, совершаемых телом в единицу времени. При равномерном вращении:
откуда .шо
Автор третьего начала термодинамики Вальтер Нернст в часы досуга разводил карпов. Однажды кто-то глубокомысленно заметил:
- Странный выбор. Кур разводить и то интересней.
Нернст невозмутимо ответил:
- Я развожу таких животных, которые находятся в термодинамическом равновесии с окружающей средой. Разводить теплокровных - это значит обогревать на свои деньги мировое пространство.
Кавендиш, один из величайших физиков-экспериментаторов своего времени, вел очень уединенный и замкнутый образ жизни. У него совершенно не было друзей, женщин же он панически боялся и со своей прислугой женского пола не вступал ни в какие разговоры, а оставлял на столе записки с поручениями. После его смерти остался миллион фунтов в банке и двадцать пачек рукописей с описанием проведенных им уникальных исследований, которые он при жизни считал ненужным публиковать.
Ньютон очень не любил отвлекаться от своих занятий, особенно по бытовым мелочам. Чтобы выпускать и впускать свою кошку, не подходя к двери, он прорезал в ней специальную дыру. Когда у кошки появились котята, то он проделал в двери для каждого котенка по дополнительному меньшему отверстию.
Давида Гильберта (1862...1943) спросили об одном из его бывших учеников.
- Ах, этот-то? - вспомнил Гильберт. - Он стал поэтом. Для математики у него было слишком мало воображения.
Резерфорд говорил, что все науки можно разделить на две группы - на физику и коллекционирование марок.
молекула газ маятник теплоемкость
Тема 2. Динамика поступательного движения. Законы Ньютона
Первый закон Ньютона: существуют такие системы отсчета, в которых всякая материальная точка (тело) сохраняет состояние покоя или равномерного

прямолинейного движения до тех пор, пока воздействие со стороны других тел не заставит ее изменить это состояние. Такие системы отсчета называются инерциальными.
Стремление тела сохранять состояние покоя или равномерного прямолинейного движения называется инертностью. Поэтому первый закон Ньютона называют также законом инерции.
Второй закон Ньютона - основной закон динамики поступательного движения - отвечает на вопрос, как изменяется механическое движение тела под действием приложенной к нему силы: если на тело действует сила, то это тело приобретает ускорение, прямо пропорциональное действующей силе и обратно пропорциональное массе данного тела:
.
В том случае, если на тела действует не одна, а несколько сил, то приведенная в этой формуле сила является равнодействующей всех действующих на это тело сил и определяется их векторной суммой.
Из уравнения второго закона Ньютона следует:
.
В случае неизменности массы тела можно записать:
где
Вектор называется импульсом (или количеством движения) тела.
Отсюда следует иная формулировка второго закона Ньютона, называемая формулировкой в дифференциальном виде, а именно: скорость изменения импульса тела равна силе, действующей на этр тело, то есть
В том случае, если на тела действует не одна, а несколько сил, то приведенная в этой формуле сила является равнодействующей всех действующих на это тело сил и определяется их векторной суммой.
Третий закон Ньютона определяет взаимодействие между материальными точками: если первая материальной точка действует на вторую с силой , то вторая точка действует на первую с силой , по модулю равной, а по направлению противоположной силе (силы и направлены по прямой, соединяющей взаимодействующие точки).
Импульс системы тел. Если принять, что импульс системы, состоящей из n тел, можно определить, как векторную сумму импульсов всех n тел, то есть , то из третьего закона Ньютона при условии отсутствия внешних сил (то есть, для замкнутой системы) следует:
, т.е. .
Таким образом, импульс замкнутой системы тел не изменяется с течением времени, что является законом сохранения импульса.
Тема 3. Работа. Кинетическая, потенциальная и полная энергия
Работа. Если на тело, движущееся прямолинейно, действует постоянная сила , которая составляет некоторый угол ? с направлением перемещения , то работа этой силы равна скалярному произведению векторов и :
.

Для переменной по величине и направлению силы вводится понятие элементарной работы силы на элементарном перемещении :

,

где ? - угол между векторами и .

Работа A силы на участке траектории от точки 1 до точки 2 равна алгебраической сумме элементарных работ на отдельных элементарных участках траектории, что приводит к интегралу

Кинетическая энергия - это механическая энергия движения тел.

Тело массой m, движущееся со скоростью , обладает кинетической энергией:

Потенциальная энергия - это механическая энергия системы тел, определяемая взаимным расположением тел или частей одного и того же тела относительно друг друга и характером сил взаимодействия между ними. Если взаимодействие тел таково, что работа, совершаемая действующими силами при перемещении тела из одного положения в другое, не зависит от того, по какой траектории это перемещение произошло, а зависит только от начального и конечного положений, то такие силы называются консервативными. Если же работа, совершаемая силой, зависит от выбора траектории перемещения тела из одной точки в другую, то такая сила называется диссипативной. Примером такой силы является сила трения.

Полная механическая энергия системы тел равна сумме кинетической и потенциальной энергий, то есть . Если неконсервативные силы отсутствуют, то полная механическая энергия системы сохраняется:

Таким образом, в системе тел, между которыми действуют только консервативные силы, полная механическая энергия сохраняется, что является законом сохранения полной механической энергии системы тел.

Тема 4. Момент инерции твердого тела. Теорема Штейнера

Моментом инерции материальной точки массой m относительно некоторой оси вращения называется физическая величина I, равная произведению массы этой материальной точки на квадрат расстояния от этой точки до данной оси вращения:

Для того, чтобы найти момент инерции твердого тела относительно некоторой оси вращения, необходимо разбить это тело на элементарные объемы так, чтобы каждый элементарный объем можно было рассматривать как материальную точку массой , находящуюся на определённом расстоянии от данной оси вращения. Тогда момент инерции твердого тела I равен сумме моментов инерции всех n материальных точек массами , на которые разбито это тело, или сумме произведений масс материальных точек на квадраты расстояний от этих материальных точек до рассматриваемой оси:

В качестве примера найдем момент инерции однородного сплошного цилиндра высотой h и радиусом R относительно оси, перпендикулярной основанию цилиндра и проходящей через его центр масс (рис. 4).

Разобьем цилиндр на отдельные полые концентрические цилиндры бесконечно малой толщины dr с внутренним радиусом r и внешним (r+dr). Так как dr<<r , то считаем, что расстояние всех точек полого цилиндра от оси равно r. Поэтому момент инерции каждого полого цилиндра можно

Рис. 4
определить следующим образом:
dI=r2dm
где dm - масса элементарного полого цилиндра, равная dV
(-- плотность материала, dV - объем полого цилиндра, равный 2rhdr).
Тогда момент инерциии элементарного полого цилиндра dI=2hr3dr.
Следовательно, момент инерции сплошного цилиндра
.
Так как R2h -- объем сплошного цилиндра, а hR2 -- его масса, то момент инерции сплошного цилиндра
Теорема Штейнера. Если известен момент инерции тела относительно оси ОО?, проходящей через центр масс тела, то момент инерции этого же тела относительно другой оси , параллельной оси ОО?, равен сумме момента инерции и произведения массы т данного тела на квадрат расстояния а между этими осями ОО? и , то есть:
.
Тема 5. Кинетическая энергия и работа вращательного движения Уравнение динамики вращательного движения твердого тела
При вращении твердого тела относительно неподвижной оси отдельные его точки, находящиеся на различном расстоянии от оси вращения, имеют различные скорости . Поэтому для того, чтобы найти кинетическую энергию вращательного движения твердого тела, необходимо разбить это тело на элементарные объемы так, чтобы каждый элементарный объем можно было рассматривать как материальную точку массой , находящуюся на определённом расстоянии от данной оси вращения. Тогда кинетическая энергия вращательного движения твердого тела равна сумме кинетических энергий всех n материальных точек массами , на которые разбито это тело
Так как для твердого тела угловая скорость вращения всех материальных точек, на которые разбито это тело, одинакова, то
,
где -- момент инерции тела относительно его оси вращения.
Момент силы. Если на тело, имеющее ось вращения ОО?, действует сила , причем вектор силы расположен в плоскости, перпендикулярной оси ОО? (рис. 5), то моментом этой силы относительно неподвижной оси ОО? называется величина, равная произведению модуля силы на плечо l этой силы относительно оси ОО? :
где l - плечо силы , то есть кратчайшее расстояние между осью ОО? и линией действия силы .Рис. 5
(Момент силы относительно оси вращения ОО? является векторной величиной, определяется векторным произведением векторов и (рис. 5), направлен вдоль оси вращения ОО? в соответствии с правилом правого винта, а модуль вектора определяется в виде
Работа при вращении твердого тела. При повороте тела на бесконечно малый угол вокруг оси ОО? под действием силы совершается элементарная работа:
где - момент силы относительно оси ОО?.

Уравнение динамики вращательного движения твердого тела. Уравнение динамики вращательного движения твердого тела может быть получено, исходя из того, что элементарная работа при вращении твердого тела идет на элементарное увеличение его кинетической энергии, то есть:

dA=dT.

Так как , а , то

или .

Учитывая, что , а ,

получим:

или в векторном виде:

В приведенной формуле: - вектор углового ускорения;

- вектор момента силы, действующей на тело, относительно его оси вращения; I - момент инерции тела относительно его оси вращения.

В том случае, если на тело, имеющее ось вращения, действует не одна, а несколько сил, то приведенный в этой формуле момент силы является результирующим моментом всех действующих на это тело сил и определяется векторной суммой всех моментов действующих сил относительно оси вращения данного тела.

Это уравнение есть уравнение динамики вращательного движения твердого тела: если на тело, имеющее ось вращения, действуют силы, то это тело приобретает угловое ускорение, прямо пропорциональное векторной сумме моментов всех действующих сил и обратно пропорциональное моменту инерции тела относительно его оси вращения.

Тема 6. Момент импульса. Закон сохранения момента импульса

Моментом импульса материальной точки, вращающейся относительно неподвижной оси OO?, называется величина L, равная произведению импульса этой точки на расстояние r от этой точки до оси вращения:

Момент импульса является векторной величиной. Вектор направлен по оси вращения в соответствии с правилом правого винта.

При вращении твердого тела относительно неподвижной оси отдельные его точки, находящиеся на различном расстоянии от оси вращения, имеют различные скорости .

Поэтому для того, чтобы найти момент импульса твердого тела относительно некоторой оси вращения, необходимо разбить это тело на элементарные объемы так, чтобы каждый элементарный объем можно было рассматривать как материальную точку массой , находящуюся на расстоянии от оси вращения и движущаяся со скоростью .

Тогда момент импульса твердого тела L равен сумме моментов импульса всех n материальных точек массами , на которые разбито это тело:

.

Так как для твердого тела угловая скорость вращения всех материальных точек, на которые разбито это тело, одинакова, то, используя формулу , получим

или в векторной форме: .

Таким образом, момент импульса твердого тела относительно оси вращения равен

произведению момента инерции этого тела относительно той же оси вращения на угловую скорость вращения этого тела.
Продифференцировав это уравнение по времени, получим:
, откуда .
То есть
Это выражение - еще одна форма (называемая дифференциальной) уравнения динамики вращательного движения твердого тела: скорость изменения момента импульса твердого тела относительно оси вращения равна векторной сумме моментов всех действующих на это тело сил относительно той же оси вращения.
В замкнутой системе векторная сумма моментов внешних сил равна нулю. Тогда
и, следовательно,
Таким образом, момент импульса замкнутой системы сохраняется, что является законом сохранения момента импульса.
Тема 7. Механические колебания. Пружинный маятник
Механическими колебаниями называются движения, характеризующиеся определенной повторяемостью во времени.
Колебания называются свободными (или собственными), если они совершаются за счет первоначально сообщенной энергии при последующем отсутствии внешних воздействий на колебательную систему.
Гармоническими колебаниями называются колебания, при которых колеблющаяся величина изменяется со временем по закону синуса (или косинуса).
Пружинный маятник - это колебательная система, состоящая из груза массой m, закрепленного на пружине, и совершающая гармонические колебания под действием упругой силы , зависящей от величины линейной деформации x в соответствии с законом Гука
Fx = - kx
где k - жесткость пружины.
Согласно второму закону Ньютона уравнение движения маятника:
Так как ускорение a является второй производной от смещения x , то
или
Если обозначить , то получим дифференциальное уравнение свободных незатухающих гармонических колебаний пружинного маятника:
Решением этого дифференциального уравнения является функция x(t):
где - отклонение колеблющегося тела от положения равновесия в момент времени t;
A - амплитуда колебания, то есть максимальное отклонение колеблющегося тела от положения равновесия;
0 - круговая (циклическая) частота;
(0t+0) - фаза колебания в момент времени t;
0 - начальная фаза колебания.
Круговая частота
где T - период колебаний, то есть время одного полного колебания.
Так как
то период свободных незатухающих гармонических колебаний пружинного

маятника
Кинетическая энергия колебаний пружинного маятника:
.
Потенциальная энергия колебаний пружинного маятника:
.
Полная энергия колебаний пружинного маятника:
откуда видно, что полная энергия свободных незатухающих гармонических колебаний пружинного маятника остается постоянной.
Свободные затухающие гармонические колебания пружинного маятника (рис. 6).
Для пружинного маятника массой т, совершающего колебания под действием упругой силы (Fx = - kx) с учетом силы сопротивления , пропорциональной скорости движения груза (), второй закон Ньютона имеет вид:
,
где r - коэффициент сопротивления.
Обозначив
 и
(- коэффициент затухания), получим дифференциальное уравнение свободных затухающих гармонических колебаний пружинного маятника:
Решением этого дифференциального уравнения в случае малых затуханий
 является функция x(t):
,
где - амплитуда затухающих колебаний в момент времени t;
 - начальная амплитуда, т.е. амплитуда в момент времени t = 0,
 - круговая (циклическая) частота
Период затухающих гармонических колебаний пружинного маятника:
.Рис. 6
Декремент затухания. Если A(t) и A(t+T) - амплитуды двух последовательных колебаний (рис. 6), то отношение этих величин называется декрементом затухания
.
Логарифм называется логарифмическим декрементом затухания :
Вынужденные гармонические колебания пружинного маятника
Незатухающие гармонические колебания в реальной колебательной системе можно получить с помощью внешней вынуждающей силы F(t), изменяющейся по гармоническому закону
Колебания, возникающие под действием внешней периодически изменяющейся силы, называются вынужденными колебаниями.
Второй закон Ньютона для вынужденных колебаний пружинного маятника:
или
.
Полученное выражение представляет собой дифференциальное уравнение вынужденных гармонических колебаний пружинного маятника.
Решением этого дифференциального уравнения является функция :
.

При этом амплитуда вынужденных колебаний определяется по формуле:
Из этой формулы следует, что амплитуда колебаний А имеет максимум при частоте , называемой резонансной частотой :
.
Явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний при приближении частоты вынуждающей силы к частоте, равной или близкой собственной частоте колебательной системы, называется резонансом.
Тема 8. Гармонические колебания физического маятника
Физический маятник - это твердое тело, имеющее ось вращения и совершающее колебания под действием тангенциальной составляющей силы тяжести F (F = mgsin (рис. 7), где - отклонение физического маятника от положения равновесия).Рис. 7
Если физический маятник массой m отклонен от положения равновесия на некоторый угол , то момент M возвращающей силы F :
где l - плечо силы F , то есть расстояние от центра масс (точка C) до оси маятника (рис. 7).
В случае малых колебаний физического маятника, то есть для малых углов отклонения маятника от положения равновесия sin   и тогда
По второму закону Ньютона для вращательного движения твердого тела:
 или
где I -- момент инерции маятника относительно его оси.
Знак минус в последнем уравнении обусловлен тем, что вектора момента возвращающей силы и угла поворота имеют противоположные направления.
Обозначив
получим дифференциальное уравнение свободных незатухающих гармонических колебаний физического маятника:
Решением этого дифференциального уравнения является функция
где - отклонение физического маятника от положения равновесия в момент времени t;
 - амплитуда колебаний;
0 - круговая (циклическая) частота;
(0t+0) - фаза колебаний в момент времени t;
0 - начальная фаза колебаний.
Период малых гармонических колебаний физического маятника:
Тема 9. Механические волны
Процесс распространения колебаний в сплошной среде называется волной.
Упругими (или механическими) называются волны, распространяющиеся в упругой среде. Упругие волны бывают продольные и поперечные.
В продольных волнах частицы среды колеблются в направлении распространения волны, а в поперечных - в плоскостях, перпендикулярных направлению распространения волны. Продольные волны могут возбуждаться в средах, в которых возникают упругие силы при деформации сжатия и растяжения, то есть в твердых, жидких и газообразных телах.
Поперечные волны могут возбуждаться только в твердых телах, в которых

возникают упругие деформации сдвига. Упругая волна называется гармонической, если соответствующие ей колебания частиц среды являются гармоническими. На рис. 8 представлена гармоническая поперечная волна, распространяющаяся со скоростью вдоль оси x, то есть приведена зависимость смещения частиц среды, участвующих в волновом процессе, от расстояния x от этих частиц до источника колебаний O для фиксированного момента времени t. Расстояние между ближайшими частицами, колеблющимися в одинаковой фазе, называется длиной волны (рис. 8). Длина волны равна расстоянию, на которое распространяется волна за время, равное периоду колебаний T , т. е. .Рис. 8

Геометрическое место точек, до которых доходят колебания к моменту времени t, называется волновым фронтом.

Геометрическое место точек, колеблющихся в одинаковой фазе, называется волновой поверхностью.

Если волновые поверхности представляют собой совокупность плоскостей, параллельных друг другу, или совокупность концентрических сфер, то, соответственно, волна называется плоской или сферической.

Уравнение плоской волны, распространяющейся вдолположительного направления оси x имеет вид:

,

где A - амплитуда волны;

 - круговая (циклическая) частота;

 - фаза плоской волны;

0 - начальная фаза волны, определяемая в общем случае выбором начала отсчета для x и для t.

Для характеристики волн используется волновое число k :

.

С учетом этого выражения для k, уравнение плоской волны примет вид:

.

Тема 9а. Сложение колебаний

Сложение гармоническихколебаний одного направления и одинаековой частоты

Гармонические колебания одинакового направления и частоты удобно складывать, изобразив колебания в виде векторов на плоскости - графически.

1). Выберем некоторую направленную прямую - ось, вдоль которой будем откладывать колеблющуюся величину x.

2). Из взятой на оси некоторой точки O отложим направленный отрезок - вектор длины A, образующий с осью угол некоторый ? .

3). Вращая вектор A вокруг точки O с угловой скоростью ? 0 , получим, что проекция конца вектора на ось будет совершать гармонические колебания с амплитудой, равной длине вектора, с круговой частотой, равной угловой скорости вращения вектора, и с начальной фазой, равной углу, образуемому вектором с осью в начальный момент времени: проекция конца вектора будет перемещаться по оси x, принимая значения от - A до + A , а координата этой проекции будет изменяться со временем по закону

Схему, полученную таким методом представления колебаний, называют векторной диаграммой.
Колеблющееся тело может принимать участие в нескольких колебательных процессах, тогда следует найти результирующее колебание, другими словами, колебания необходимо сложить.
В данном разделе будем складывать гармонические колебания одного направления и одинаковой частоты
применяя метод вращающегося вектора амплитуды, построим графически векторные диаграммы этих колебаний (рисунок).
Так как векторы А1 и А2 вращаются с одинаковой угловой скоростью ?0, то разность фаз (?2 - ?1) между ними будет оставаться постоянной. Значит, уравнение результирующего колебания будет
(1)
В формуле (1) амплитуда А и начальная фаза ? соответственно определяются выражениями
Значит, тело, участвуя в двух гармонических колебаниях одного направления и одинаковой частоты, совершает при этом также гармоническое колебание в том же направлении и с той же частотой, что и складываемые колебания. Амплитуда результирующего колебания зависит от разности фаз (?2 - ?1) складываемых колебаний.
Исследуем выражение для амплитуды А в зависимости от разности фаз (?2 - ?1): 1) ?2 - ?1 = ±2m? (m = 0, 1, 2, ...), тогда A=A1+A2, т. е. амплитуда результирующего колебания А будет равна сумме амплитуд складываемых колебаний; 2) ?2 - ?1 = ±(2m+1)? (m = 0, 1, 2, ...), тогда A=|A1-A2|, т. е. амплитуда результирующего колебания будет равна разности амплитуд складываемых колебаний.
Сложение взаимно перпендикулярных колебаний.
Числом степеней свободы механической системы называется число независимых координат, необходимых для описания состояния этой системы. Если колебательная система имеет больше чем одну степень свободы, то при колебаниях могут изменяться все координаты, которые соответствуют этим степеням свободы системы.
В качестве примера колебательной системы, имеющей две степени свободы, рассмотрим тяжелый шар, подвешенный на длинной тонкой нити (математический маятник). При определенных внешних воздействиях этот шар может совершать два колебания во взаимно перпендикулярных направлениях. Если возбудить одновременно оба колебания, то шар будет двигаться по некоторой сложной траектории, форма которой зависит от частот и разности фаз обеих колебаний.
Другая модель, на которой можно продемонстрировать сложение взаимно перпендикулярных колебаний, представлена на рисунке. Маятник (материальная точка массой m) может совершать колебания по осям ОХ и ОУ под действием двух сил упругости, направленных взаимно перпендикулярно.
Рассмотрим сложение двух взаимно перпендикулярных гармонических колебаний одинаковой частоты ?. Пусть материальная точка участвует в двух колебаниях,

которые совершаются вдоль координатных осей X и Y. Уравнения колебаний будут:
При разности фаз, равной .уравнением траектории является уравнение эллипса, приведенного к координатным осям:
Полуоси эллипса равны соответствующим амплитудам колебаний. Если амплитуды А и В равны, эллипс превращается в окружность.
Тема 10. Механика жидкости. Уравнение Бернулли
Гидростатика. Для несжимаемой жидкости ее плотность не зависит от давления. При поперечном сечении S столба жидкости плотностью и высотой h давление жидкости р на нижнее основание:
.
Давление называется гидростатическим давлением.
Плотность тела в точке записывается как тогда масса неоднородного тела (тела с плотностью, зависящей от места) рассчитывается как
Как и в случае абсолютно твердого тела, применимость представления об абсолютно несжимаемой жидкости определяется не столько свойствами самой жидкости, сколько условиями, в которых она находится. Например, при изучении распространения звуковых волн в жидкости всегда необходимо учитывать ее сжимаемость, в то время как при изучении движения потоков не только жидкость, но и газ часто можно рассматривать как несжимаемые.
Гидродинамика. Графически движение жидкостей изображается с помощью линий тока, которые проводятся так, что касательные к ним совпадают по направлению с вектором скорости жидкости в соответствующих точках пространства (рис. 9). Линии тока проводятся таким образом, чтобы их густота характеризовала величину скорости: густота больше там, где больше скорость течения жидкости, и меньше там, где жидкость течет медленнее.
Часть жидкости, ограниченную линиями тока, называют трубкой тока (рис. 10).
Течение жидкости называется установившимся (или стационарным), если форма и расположение линий тока, а также значения скоростей в каждой ее точке со временем не изменяются.
Рис. 9   Рис. 10
Уравнение неразрывности струи для несжимаемой жидкости. Рассмотрим какую-либо трубку тока. Выберем два ее сечения S1 и S2 , перпендикулярные направлению скорости (рис. 10).
За время t через сечение S1 проходит объем жидкости
где - скорость течения жидкости в месте сечения S1, а через сечение S2 за тоже время t пройдет объем жидкости
где - скорость течения жидкости в месте сечения S2 . Если жидкость несжимаемая, то через сечение S2 пройдет такой же объем жидкости, как и через сечение S1 , т. е.
.
Так как положения сечений S1 и S2 выбраны произвольно, то отсюда следует, что вдоль данной трубки тока . Это соотношение называется уравнением неразрывности струи для несжимаемой жидкости.
Уравнение Бернулли. Бернулли рассмотрел изменения гидродинамических

параметров вдоль произвольно выбранной трубки тока стационарно текущей жидкости плотностью (рис. 11).Рис. 11

В месте сечения трубки тока S1 скорость течения жидкости , давление p1 и высота, на которой это сечение расположено относительно выбранного уровня отсчета, h1.

Аналогично, в месте сечения трубки тока S2 скорость течения жидкости , давление p2 и высота расположения этого сечения над тем же уровнем отсчета h2 .

Бернулли установил, что для любых двух сечений одной трубки тока несжимаемой жидкости выполняется равенство:

.

Так как положения сечений было выбрано произвольно, то для любой трубки тока несжимаемой жидкости гидродинамические параметры жидкости подчиняются следующему уравнению (уравнению Бернулли):

.

Для горизонтальной трубки тока (h = const) уравнение Бернулли принимает вид:

где величина называется полным давлением;

величина p называется статическим давлением;

величина называется динамическим давлением.

Из уравнения Бернулли для горизонтальной трубки тока и уравнения неразрывности струи следует, что при течении жидкости по горизонтальной трубе, имеющей различные сечения, скорость жидкости больше в местах сужения, а статическое давление, наоборот, в местах сужения меньше.

Динамика движения реальной жидкости очень сложна. Для упрощения ее описания в некоторых случаях можно пренебречь силами внутреннего трения. Такую жидкость называют идеальной. При движении идеальной жидкости не происходит превращения механической энергии во внутреннюю, механическая энергия жидкости сохраняется. Уравнение Бернулли было выведено для достаточно узкой трубки тока и, строго говоря, справедливо, когда эта трубка тока сжимается в линию тока.

Формула Торричелли. Формула Торричелли позволяет находить скорость истечения жидкости через малое отверстие в стенке или дне сосуда (рис. 12). Формула Торричелли следует из уравнения Бернулли. Если применить это уравнение для двух сечений S1 и S2 (S1 на уровне h1 свободной поверхности жидкости в сосуде и S2 на уровне отверстия h2), то получим равенство:Рис.12

.

Так как давления p1 и p2 жидкости на уровнях первого и второго сечений равны атмосферному, то p1=p2 , а полученное соотношение примет вид:

.

Из уравнения неразрывности струи следует, что

где S1 и S2 - площади поперечных сечений сосуда и отверстия.

Так как S1>>S2 , то и членом можно пренебречь.

Тогда

,

откуда .

Это выражение получило название формулы Торричелли, где h - высота свободной поверхности жидкости в сосуде над уровнем отверстия.
Формула Торричелли справедлива только для идеальной жидкости, то есть для жидкости, в которой отсутствует вязкость или внутреннее трение. Только в этом случае скорость истечения жидкости из малого отверстия такая же по величине, как и скорость тела, свободно падающего с высоты h.
Гидравлимческий удамр (гидроудар) -- скачок давления в какой-либо системе, заполненной жидкостью, вызванный крайне быстрым изменением скорости потока этой жидкости за очень малый промежуток времени. Может возникать вследствие резкого закрытия или открытия задвижки.
В первом случае гидроудар называют положительным, во втором - отрицательным. Опасен положительный гидроудар. При положительном гидроударе несжимаемую жидкость следует рассматривать как сжимаемую.
Гидравлический удар способен вызывать образование продольных трещин в трубах, что может привести к их расколу, или повреждению других элементов трубопровода. Также гидроудары чрезвычайно опасны и для другого оборудования, такого как теплообменники, насосы и сосуды, работающие под давлением. Для предотвращения гидроударов, вызванных резкой переменой направления потока рабочей среды, на трубопроводах устанавливаются обратные клапаны.
Даниимл Бернумлли (Daniel Bernoulli; 29 января (8 февраля) 1700 -- 17 марта 1782), швейцарский физик-универсал, механик и математик, один из создателей кинетической теории газов, гидродинамики и математической физики. Академик и иностранный почётный член (1733) Петербургской академии наук, член Академий: Болонской (1724), Берлинской (1747), Парижской (1748), Лондонского королевского общества (1750).
ЧАСТЬ II. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА
Тема 1. Уравнение состояния идеального газа
Состояние системы задается термодинамическими параметрами - совокупностью физических величин, характеризующих свойства термодинамической системы, например, давлением p, объемом V и температурой T. Между этими параметрами существует определенная связь, называемая уравнением состояния. Для идеального газа уравнением состояния является уравнение Клапейрона - Менделеева:
,
где m - масса газа, - молярная масса (масса одного моля вещества);
 - количество вещества;
R - универсальная газовая постоянная, .
(Идеальным называется такой газ, в котором считается, что собственный объем молекул газа пренебрежимо мал по сравнению с объемом сосуда, в котором он находится, силы взаимодействия между молекулами газа отсутствуют, а столкновения между молекулами газа абсолютно упругие.) Исходя из уравнения Клапейрона - Менделеева и понятия концентрации n (n - число молекул в единице объема
где N - число всех молекул газа), можно получить уравнение состояния идеального

газа в ином виде:
, то есть ,
где - постоянная Авогадро - число молекул в одном моле вещества,
, - постоянная Больцмана.
Тема 2. Термодинамические процессы. Изопроцессы
Любое изменение в системе, связанное с изменением ее термодинамических параметров, называется термодинамическим процессом.
Из уравнения Клапейрона - Менделеева следует, что
то есть для данной массы газа
в любом термодинамическом процессе, что является объединенным газовым законом.
Если в термодинамическом процессе один из параметров газа () не изменяется, то такой процесс называется изопроцессом.
Процесс, протекающий при постоянном давлении, называется изобарным. Из объединенного газового закона для изобарного процесса следует:
(уравнение изобарного процесса).
Процесс, протекающий при постоянном объеме, называется изохорным. Из объединенного газового закона для изохорного процесса следует:
(уравнение изохорного процесса).
Процесс, протекающий при постоянной температуре, называется изотермическим.
Для изотермического процесса:
(уравнение изотермического процесса).
Тема 3. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа
Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа связывает термодинамические параметры газа с параметрами, характеризующими движение его молекул. Так, давление газа, как следствие соударений молекул газа со стенками сосуда, определяется, согласно основному уравнению молекулярно-кинетической теории идеального газа, кинетической энергией поступательного движения молекул газа.
При выводе основного уравнения молекулярно-кинетической теории идеального газа полагают, что соударения молекул газа со стенками сосуда являются абсолютно упругими. Тогда, при соударении одна молекула газа массой m0, движущаяся перпендикулярно стенке сосуда со скоростью , передает ей импульс
Выделив на стенке сосуда элементарную площадку S (рис. 1), определяют давление газа p на эту площадку. Построив цилиндр с основанием S и высотой (рис. 1), учитывают, что число молекул, способных за время t достигнуть площадки S соответствует Рис. 1.
1/6 части всех N молекул, содержащихся в объеме выделенного цилиндра
где n - концентрация молекул). Коэффициент 1/6 учитывает, что из всех N молекул, движущихся хаотично вдоль трех (x, y, z) взаимно перпендикулярных направлений, только их 1/6 часть движется по направлению к площадке S.
Тогда число ударов молекул, движущихся в данном направлении, о площадку S за время t будет равно

При столкновении с площадкой S эти молекулы передадут ей импульс P:
,
что соответствует, согласно второму закону Ньютона, действию силы F:
.
Тогда давление газа, оказываемое им на стенки сосуда:
.
Однако, молекулы газа движутся с различными скоростями , ,…., что можно учесть в полученной формуле, введя понятие средней квадратичной скорости движения молекул :
, тогда .
Так как , а
- средняя кинетическая энергия движения одноатомной молекулы, то получим:
где E - суммарная кинетическая энергия всех молекул газа,
Таким образом, получены два эквивалентных уравнения:
и
связывающие кинематические параметры движения отдельных молекул газа с термодинамическими параметрами газа в целом, каждое из которых называют основным уравнением молекулярно-кинетической теории идеального газа.
Из сравнения между собой уравнений
и следует, что
то есть еще одно уравнение, связывающее термодинамический параметр газа (T) со средней кинетической энергией молекулы одноатомного газа .
С другой стороны, величина средней кинетической энергии молекул газа определяется температурой газа T (для случая одноатомного газа):
.
Тема 4. Распределение молекул идеального газа по скоростям
В газе, находящемся в состоянии равновесия при определенной температуре, устанавливается некоторое стационарное, не меняющееся со временем распределение молекул по скоростям. Максвелл установил, что это распределение для идеального газа описывается некоторой функцией , называемой функцией распределения молекул газа по скоростям.
Если разбить диапазон скоростей молекул на малые интервалы, равные , то на каждый интервал скорости будет приходиться некоторое число молекул , имеющих скорость, заключенную в этом интервале. Функция определяет относительное число молекул , скорости которых лежат в интервале от до , т. е.
, откуда .
Применяя методы теории вероятностей, Максвелл нашел вид этой функции:
,
где - масса одной молекулы газа.
График этой функции приведен на рис. 1.
Рис. 1
Относительное число молекул , скорости которых лежат в интервале от до , соответствует площади заштрихованной на рис. 2 полоски. Площадь под всей кривой

распределения равна единице. Это означает, что функция удовлетворяет условию нормировки:
Скорость, при которой функция распределения молекул идеального газа по скоростям максимальна, называется наиболее вероятной скоростью :
.
Из этой формулы следует, что при повышении температуры максимум функции распределения молекул по скоростям (рис. 2) смещается вправо. При этом величина максимума функции распределения молекул по скоростям с повышением температуры уменьшается (рис. 2).
Рис. 2
Кроме наиболее вероятной скорости , на рис. 2 приведены также средняя арифметическая скорость молекул и средняя квадратичная скорость молекул , которые определяются по формулам:
; .
Тема 5. Барометрическая формула. Распределение Больцмана
Барометрическая формула определяет зависимость атмосферного давления воздуха от высоты. Молекулы воздуха находятся, с одной стороны, в потенциальном поле сил тяготения Земли, а, с другой - , в состоянии теплового хаотического движения, что приводит к некоторому стационарному состоянию, при котором давление газа с высотой убывает.
Если атмосферное давление на высоте h равно p (рис. 4), то на высоте h+dh оно равно p+dp , причем при dh>0 изменение давления dp<0.
Так как dh настолько мало, что при изменении высоты h в этих пределах плотность воздуха можно считать постоянной, то разность давлений:
, то есть
Рис. 3
Выражение для плотности газа можно получить из уравнения состояния идеального газа
 , а именно ,
где m - масса газа, - молярная масса газа.
Тогда
 или .
С изменением высоты от 0 до h давление изменяется от p0 до p (рис. 3).
Поэтому, интегрируя в этих пределах предыдущее уравнение, получим:
, то есть
откуда
Это выражение называется барометрической формулой, где p0 - давление на нулевом уровне отсчета высоты h, то есть на уровне, где принято h = 0.
Барометрическую формулу можно преобразовать в зависимость концентрации молекул воздуха n от высоты h, если воспользоваться уравнением состояния идеального газа p=nkT :
где n - концентрация молекул воздуха на высоте h,
n0 - концентрация молекул воздуха на высоте h=0.

Так как (m0 - масса одной молекулы, - постоянная Авогадро), а
, то или .
В этой формуле
где U - потенциальная энергия молекулы массой m0 , находящейся в поле сил тяготения Земли на высоте h от уровня, на котором потенциальная энергия молекул воздуха принята равной нулю, а концентрация молекул обозначена как n0. Тогда n соответствует концентрации молекул в том месте, где потенциальная энергия молекулы воздуха равна U. Таким образом, получено распределение молекул по потенциальной энергии в силовом поле (распределение Больцмана).
Тема 6. Явления переноса (диффузия, теплопроводность, вязкость)
В неравновесных системах возникают особые необратимые процессы, называемые явлениями переноса, в результате которых происходит пространственный перенос массы, энергии, импульса.
Диффузия обусловлена переносом массы, теплопроводность - переносом энергии, а вязкость - переносом импульса.
Для характеристики необратимых процессов переноса вводятся параметры теплового движения молекул: среднее число соударений молекулы в единицу времени и средняя длина свободного пробега молекул .
Среднее число соударений молекулы за 1 с определяется по формуле:
где d - эффективный диаметр молекул, т.е. минимальное расстояние, на которое сближаются при столкновении центры двух молекул,
 - эффективное сечение молекул, - концентрация молекул,
 - средняя арифметическая скорость молекул.
Средняя длина свободного пробега молекул , т.е. средний путь, проходимый молекулой между двумя последовательными столкновениями:
При рассмотрении одномерных явлений переноса система отсчета выбирается так, чтобы ось х была ориентирована в направлении переноса.
1. Диффузия. Явление диффузии заключается в том, что происходит самопроизвольное взаимопроникновение и перемешивание частиц двух соприкасающихся газов, жидкостей и даже твердых тел. Диффузия сводится к переносу массы, возникает и продолжается до тех пор, пока на границе соприкосновения двух сред градиент плотности отличен от нуля.
Градиент плотности вдоль выбранной оси х, перпендикулярной плоскости соприкосновения двух сред, обозначается как и показывает как быстро изменяется величина плотности от точки к точке вдоль оси х.
Количественно явление диффузии подчиняется закону Фика:
где - плотность потока массы, то есть величина, определяемая массой газа, диффундирующего через единичную площадку S в единицу времени,
 - градиент плотности газа в направлении х, перпендикулярном выбранной площадке S ,
D - коэффициент диффузии.
Знак минус в приведенной формуле означает, что перенос массы происходит в направлении убывания плотности.

Согласно молекулярно-кинетической теории идеального газа, коэффициент D:
где - средняя скорость теплового движения молекул,
- средняя длина свободного пробега молекул.
2. Теплопроводность. Если в одной области газа температура больше, чем в другой, то с течением времени вследствие постоянных столкновений молекул происходит процесс выравнивания средних кинетических энергий молекул, то есть процесс выравнивания температуры. Этот процесс переноса энергии, называемый теплопроводностью, возникает и продолжается до тех пор, пока на границе соприкосновения двух частей газа градиент температуры отличен от нуля.
Градиент температуры T газа вдоль выбранной оси x, перпендикулярной плоскости соприкосновения двух частей газа, имеющих различную температуру, обозначается как и показывает как быстро изменяется температура газа от точки к точке вдоль оси x.
Количественно теплопроводность подчиняется закону Фурье:
где - плотность теплового потока - величина, определяемая энергией, переносимой в форме теплоты через единичную площадку S в единицу времени,
- градиент температуры в направлении x, перпендикулярном выбранной площадке S,
- коэффициент теплопроводности.
Знак минус в приведенной формуле означает, что при теплопроводности энергия переносится в направлении убывания температуры.
Согласно молекулярно-кинетической теории идеального газа, коэффициент теплопроводности определяется следующим образом:
где - удельная теплоемкость газа при изохорном процессе (количество теплоты, необходимое для изохорного нагревания 1 кг газа на 1 К),
- плотность газа,
- средняя скорость теплового движения молекул,
- средняя длина свободного пробега молекул.
3. Вязкость. Вязкость это свойство жидкости или газа, обусловленное внутренним трением между соприкасающимися параллельными слоями жидкости или газа, движущимися с различными скоростями. В результате, импульс слоя, движущегося быстрее, уменьшается, а движущегося медленнее - увеличивается, что приводит к торможению слоя, движущегося быстрее, и ускорению слоя, движущегося медленнее. Другими словами, внутреннее трение приводит к переносу импульса от одного движущегося слоя жидкости или газа к другому соприкасающемуся с ним слою.
Количественно сила внутреннего трения между двумя соприкасающимися слоями жидкости или газа подчиняется закону Ньютона:
где - коэффициент динамической вязкости,
- градиент скорости, показывающий быстроту изменения скорости течения жидкости или газа от слоя к слою в направлении x, перпендикулярном направлению движения слоев,
S - площадь соприкосновения слоев жидкости или газа, на которые действует сила внутреннего трения F.

Закон Ньютона для внутреннего трения можно представить в виде:
где - плотность потока импульса - величина, определяемая импульсом, переносимым в единицу времени через единичную площадку S соприкосновения слоев жидкости или газа в направлении оси x, перпендикулярном направлению движения слоев жидкости или газа.
Знак минус в приведенной формуле означает, что импульс переносится от слоя к слою жидкости (газа) в направлении убывания скорости их движения.
Согласно молекулярно-кинетической теории идеального газа, коэффициент динамической вязкости идеального газа определяется следующим образом:
где - плотность газа,
 - средняя скорость теплового движения молекул,
 - средняя длина свободного пробега молекул.
Тема 7. Первое начало термодинамики. Внутренняя энергия. Работа. Применение первого начала термодинамики к изопроцессам
Внутренней энергией газа U называется сумма кинетической энергии хаотического (теплового) движения всех молекул газа и энергии взаимодействия молекул газа между собой. Для идеального газа внутренняя энергия - это только кинетическая энергия всех молекул газа.
Внутренняя энергия идеального газа определяется числом степеней свободы его молекул и температурой газа.
Числом степеней свободы i механической системы называется количество независимых величин, с помощью которых может быть однозначно задано положение системы в пространстве.
Согласно закону о равнораспределении энергии по степеням свободы молекул для термодинамической системы, находящейся в равновесии, на каждую поступательную и вращательную степени свободы приходится в среднем кинетическая энергия, равная , а на каждую колебательную степень свободы - в среднем энергия, равная kT.
Колебательная степень «обладает» вдвое большей энергией потому, что на нее приходится не только кинетическая энергия (как в случае поступательного и вращательного движений), но и потенциальная, причем средние значения кинетической и потенциальной энергий одинаковы....