Министерство образования и науки Российской Федерации
Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
Иркутский государственный аграрный университет им. А.А. Ежевского

Клибанова Ю. Ю., Вржащ Е.Э., Бузунова М. Ю.

Механика и молекулярная физика. Ч.1.

Учебное пособие

Молодёжный 2020

УДК 531/534 +539.1] (076/5)
К49
Печатается по решению методической комиссии НМС Иркутского ГАУ им. А.А. Ежевского протокол № 4 от 25 мая 2020 года.

Рецензенты:
Доктор технических наук, профессор кафедры ЭО и физики Кузнецов, Борис Фёдорович

Доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук Мишин Владимир Виленович.

Клибанова, Ю. Ю.
Механика и молекулярная физика. Ч.1. Учебное пособие/ Ю. Ю. Клибанова, Е. Э. Вржащ, М. Ю. Бузунова; Иркутский государственный аграрный университет им. А. А. Ежевского. – Молодёжный: Изд-во ИрГАУ, 2020. – 104 с.

Учебное пособие содержит теоретическое описание основных понятий механики, молекулярной физики, а также описание лабораторных работ и виртуальных лабораторных работ по физике: механика и молекулярной физика. Каждая работа включает название, цель работы, приборы и принадлежности, теорию, описание хода выполнения, расчета, выводы и перечень контрольных вопросов. Объяснение хода выполнения работы сопровождается рисунками экспериментальных установок, расчетными формулами и итоговыми таблицами. Обучающиеся получают четкую последовательность действий, направленную на достижение цели.

Учебное пособие соответствует программе курса физики направлений подготовки 35.03.06 – Агроинженерия, 13.03.01 – Теплоэнергетика и теплотехника, 13.03.02 – Электроэнергетика и электротехника, высших учебных заведений и ориентировано на освоение общепрофессиональных компетенций.

Предназначено для межвузовского использования студентами очной, заочной и дистанционной форм обучения.

ВВЕДЕНИЕ

Физика изучает общие свойства окружающего нас материального мира. Это фундаментальная наука: её понятия и законы лежат в основе не только любых разделов естествознания, но и дисциплин профессионального цикла.

Дисциплина «Физика» является общеобразовательной дисциплиной, в процессе изучения которой обучающиеся должны приобрести знания о фундаментальных физических законах и принципах, лежащих в основе современной физической картины мира; наиболее важных открытиях в области физики, оказавших определяющее влияние на развитие техники и технологии; методах научного познания природы. Обучение физике предусматривает не только теоретическое изучение различных законов и явлений, но и привлечение обучающихся к видам деятельности, позволяющим использовать приобретенные знания на практике. К таким видам деятельности относится выполнение лабораторных работ. Под лабораторными работами понимают такую организацию учебного физического эксперимента, при которой каждый учащийся работает с приборами или установками. Выполнение лабораторных работ способствует углублению знаний обучающихся по определенному разделу физики, приобретению новых знаний, ознакомлению с современной экспериментальной техникой, развитию логического мышления.

Учебное пособие включает теорию, а также описание лабораторных работ по механике и молекулярной физике, которые выполняются с помощью приборной базы, а также описание виртуальных лабораторных работ. «Виртуальный практикум» включает в себя комплекты лабораторных работ на основе параметрических и имитационных моделей. Виртуальные лабораторные работы выполняются при помощи компьютеров и являются незаменимым инструментом для моделирования явлений и процессов в отсутствии возможности их реального воссоздания. В этих моделях есть возможность менять несколько типов параметров, влияя на результат эксперимента. Каждая лабораторная работа содержит описание, цели их проведения, необходимое оборудование, теоретические сведения. Объяснение хода выполнения работы сопровождается рисунками экспериментальных установок, расчетными формулами и итоговыми таблицами. Обучающиеся получают четкую последовательность действий, направленную на достижение цели.

Данное пособие преследует цель активизировать и обеспечить самостоятельную работу студентов, и, кроме того, оказать значительную помощь студентам в выполнении опытной части непосредственно в лабораториях.

В своей основе физика – экспериментальная наука: её законы базируются на фактах, установленных опытным путем. В результате обобщения экспериментальных фактов устанавливаются физические законы – устойчивые повторяющиеся объективные закономерности, существующие в природе, устанавливающие связь между физическими величинами. Все, что мы у знали о материальном мире, возникло из опыта. И любые заключения и предположения, которые мы делаем о свойствах материальных объектов, в конечном счете, проверяются на опыте. Опыт является окончательным критерием правильности наших представлений. В процессе опыта мы определяем те или иные физические величины, например скорость или температуру. Таким образом, определить физическую величину означает указать способ ее измерения. Физические величины являются наблюдаемыми. Напротив, если мы говорим о какой-либо величине и не можем указать способ её измерения, то она не является наблюдаемой. Такие величины просто не рассматриваются в физике, не являются её предметом. Физические величины являются достоверными в том смысле, что физический опыт должен обладать свойством повторяемости. Это значит, что при повторении опыт, проведенный в равных условиях, должен приводить всякий раз к одинаковому результату. В других науках это не всегда так, и чем менее выполняется это требование, тем менее эта наука достоверна. Физические величины обладают свойством размерности. Под размерностью физической величины понимают совокупность параметров, необходимых для её определения. Другими словами, указать размерность физической величины означает указать, какие измерения нужно произвести, чтобы её определить. Самые простые физические величины – это длина, время и масса.

Международная система единиц, СИ (Le Système International d'Unités — SI) — совокупность единиц физических величин, основными единицами которой являются метр и килограмм. СИ появилась на смену метрической системы. Она была принята в октябре 1960 года на 11 генеральной конференции по мерам и весам. Некоторые последующие конференции внесли в СИ ряд изменений.

СИ является наиболее широко используемой системой единиц в мире, как в повседневной жизни, так и в науке и технике.

Таблица №1 Основные единицы СИ

Величина	Наименование единицы	Обозначение единицы	
		международное	русское

Длина	метр	m	м
Масса	килограмм	kg	кг
Время	секунда	s	с
Сила электрического тока	ампер	A	А
Термодинамическая температура	кельвин	K	К
Количество вещества	моль	mol	моль
Сила света	кандела	cd	кд

Длительное время единицы плоского угла – радиан и телесного угла – стерадиан считались в СИ дополнительными к осн. единицам для образования производных единиц. В 1995 решением 20-й ГКМВ класс дополнит. единиц исключён из СИ, а радиан и стерадиан отнесены к безразмерным производным единицам, имеющим собств. наименования и обозначения для использования в обозначениях производных единиц, зависящих от плоского или телесного угла. В качестве осн. единицы СИ используется также арифметич. единица (обозначение «1») для безразмерных величин и величин, связанных с числом объектов. В выражении значений безразмерных величин обозначение единицы «1» не пишется, но обозначения дольных от неё единиц – % (процент), ‰ (промилле) и млн$^{-1}$ (миллионная доля, ppm) – используются в общем для СИ порядке.

Примеры производных единиц СИ приведены в таблице 2. Некоторым производным единицам СИ присвоены спец. наименования для упрощённой формы выражения часто используемых комбинаций осн. единиц. Такими производными единицами являются: радиан, стерадиан, герц, ньютон, паскаль, джоуль, ватт, кулон, вольт, фарад, ом, сименс, вебер, тесла, генри, градус Цельсия, люмен, люкс, беккерель, грэй, зиверт и установленная 21-й ГКМВ в 1999 единица каталитич. активности – катал (1 кат = 1 с$^{-1}$·моль). Если назв. единицы происходит от имени собственного, то её обозначение начинается с прописной буквы; напр., ампер – А, кельвин – К, герц – Гц, кулон – Кл. Во всех остальных случаях обозначение единицы начинается со строчной буквы; напр., метр – м, секунда – с, моль – моль. Обозначения единиц пишутся с интервалом после числовых значений величин.

Таблица №2 Производные единицы СИ

Величина	Наименование единицы	Обозначение единицы
Площадь	квадратный метр	м^2
Объём	кубический метр	м^3

Скорость	метр в секунду	м/с
Ускорение	метр на секунду в квадрате	$м/с^2$
Волновое число	метр в минус первой степени	$м^{-1}$
Плотность объёмная	килограмм на кубический метр	$кг/м^3$
Плотность силы электрического тока	ампер на квадратный метр	$А/м^2$
Напряжённость магнитного поля	ампер на метр	А/м
Молярная концентрация	моль на кубический метр	$моль/м^3$
Массовая концентрация	килограмм на кубический метр	$кг/м^3$
Яркость	кандела на квадратный метр	$кд/м^2$
Показатель преломления	арифметическая единица	1

1. МЕХАНИКА

Механика является одним из разделов физики. Под механикой обычно понимают классическую механику. Механика – наука, изучающая движение тел и происходящие при этом взаимодействия между ними.

В частности, каждое тело в любой момент времени занимает определенное положение в пространстве относительно других тел. Если со временем тело меняет положение в пространстве, то говорят, что тело движется, совершает механическое движение.

Механическим движением называется изменение взаимного положения тел в пространстве с течением времени.

Основная задача механики – определение положения тела в любой момент времени. Для этого нужно уметь кратко и точно указать, как движется тело, как при том или ином движении изменяется его положение с течением времени. Другими словами – найти математическое описание движения, т. е. установить сязи между величинами, характеризующими механическое движение.

При изучении движения материальных тел используют такие понятия, как:

- *материальная точка* – тело, размерами которого в данных условиях движения можно пренебречь. Это понятие используется при поступательном движении, или когда в изучаемом движении можно пренебречь вращением тела вокруг его центра масс,
- *абсолютно твердое тело* – тело, расстояние между двумя любыми точками которого не меняется. Понятие применяется, когда можно пренебречь деформацией тела.
- *сплошная изменимая среда* – понятие применимо, когда можно пренебречь молекулярной структурой тела. Используется при изучении движения жидкостей, газов, деформируемых твердых тел.

Классическая механика основана на принципе относительности Галилея и законах Ньютона. Поэтому, ее еще называют – *механикой Ньютона*.

Механика изучает движение материальных тел, взаимодействия между материальными телами, общие законы изменения положений тел со временем, а также причины вызывающие эти изменения.

Общие законы механики подразумевают, что они справедливы при изучении движения и взаимодействия любых материальных тел (кроме элементарных частиц) от микроскопических размеров до объектов астрономических.

Механика включает в себя следующие разделы:

- *кинематика* (изучает геометрическое свойство движения тел без причин, вызвавших это движение),
- *динамика* (изучает движение тел с учетом причин вызвавших это движение),
- *статика* (изучает равновесие тел под действием сил).

Следует отметить, что это не все разделы, которые входят в механику, но это основные разделы, которые изучает школьная программа. Кроме разделов указанных выше существует еще ряд разделов как имеющих самостоятельное значение, так и тесно связанных между собой и с указанными разделами.

Например:

- механика сплошных сред (включает в себя гидродинамику, аэродинамику, газовую динамику, теорию упругости, теорию пластичности);
- квантовая механика;
- механика машин и механизмов;
- теория колебаний;
- механика переменной масс;
- теория удара;
- и др.

Появление дополнительных разделов связано как с выходом за границы применимости классической механики (квантовая механика), так и с детальным изучением явлений происходящих при взаимодействии тел (например, теория упругости, теория удара).

Но, несмотря на это, классическая механика не теряет своего значения. Она является достаточной для описания в широком диапазоне наблюдаемых явлений без необходимости обращаться к специальным теориям. С другой стороны она проста для понимания и создает базу для других теорий.

Механика имеет большое значение для многих разделов астрономии, особенно для небесной механики (где изучаются движения планет, звезд и т. д.).

Особое значение механика имеет для техники. В гидродинамике, аэродинамике, динамике машин и механизмов, теории движения наземных, воздушных и транспортных средств используют уравнения и методы теоретической механики.

1.1 Основы кинематики

Любое физическое явление представляет собой последовательность событий. Для описания любого события необходимо иметь *систему отсчета.*

Система координат *X, Y, Z,* тело отсчета (материальная точка), с которым она связана, и часы для измерения времени образуют систему отсчета, относительно которой рассматривается движение тела.

Телом отсчета называют тело, по отношению к которому рассматривают изменение положения других тел в пространстве.

С телом отсчета связывается система координат, которая представляет собой точку отсчета. Для определения положения тела в пространстве в любой момент времени необходимо задать начало отсчета времени.

При решении каждой конкретной задачи выбирают удобную систему отсчета и удобную систему координат, а часы (идеальные) в каждой системе отсчета нужны лишь одни. Однако, тело отсчета, начало отсчета и направления координатных осей выбираются произвольно.

В отличие от геометрии, рассматривая физические явления, при произвольном построении координатной системы неявно подразумеваются два важных свойства пространства в вакууме: однородность и изотропность.

Однородность – это тождественность всех точек пространства. Это очень существенное свойство, которое позволяет пользоваться физикой. Законы физики одинаковы в разных точках Земли, как и в пределах Солнечной системы, что и позволяет помещать начало отсчета в любую удобную точку. Поворачивая координатную систему вокруг начала подразумевается, что от этого ничего не может измениться. Но это означает, что все направления, идущие от данной точки, тождественны по своим свойствам. Это и есть *изотропность* пространства.

Виды систем отсчета могут быть различны: неподвижная, подвижная, инерциальная, неинерциальная. Систему отсчета можно выбрать произвольно. При кинематических исследования все системы отсчета равноправны, а в задачах динамики удобнее всего инерциальные системы отсчета, так как в них характеристики движения имеют более простой вид.

Понятие «материальная точка» вводится для описания с помощью математических формул механического движения тел, поскольку описывать движение точки проще, чем реального тела, частицы которого, к тому же могут двигаться с разными скоростями.

Реальные движения тел довольно сложны, и изучая их возникает необходимость отвлечься от несущественных для данного движения деталей. С этой целью используют некоторые понятия, применимость которых определяется изучаемым движением.

Заменив тело материальной точкой, ей приписывают массу этого тела, пренебрегая его размерами, а вместе с этим и различием характеристик движения его точек.

Любое тело можно представить в виде материальной точки, если расстояния, проходимые телом, очень велики по сравнению с его размерами.

Тело, размерами которого в данных условиях движения можно пренебречь, называют *материальной точкой*. Слова «в данных условиях» означают, что при одних движениях тело можно считать материальной точкой, а при других – нет. Например, планеты при изучении их движения вокруг Солнца считаются материальными точками. Однако, решая задачи, связанные с суточным вращением планет, считать планеты материальными точками уже нельзя.

При поступательном движении тела, даже если его размеры сопоставимы с расстоянием, которое оно проходит, тело можно рассматривать в качестве материальной точки, поскольку все его точки движутся одинаково.

Массой тела называется физическая величина, характеризующая его инерционные и гравитационные свойства.

Инерционные свойства массы в ньютоновой механике (т. е. при скоростях, существенно меньших скорости света) характеризуются соотношениями между массой *m*, импульсом *p* тела, действующей на тело *силой F* и его ускорением:

$$p = mv,$$
$$\Delta p / \Delta t = F,$$
$$F = ma.$$

Чем больше масса тела, тем более оно инертно. Массы тел можно сравнивать по ускорениям, которые тела приобретают при взаимодействии друг с другом. Чем меньше меняется скорость тела при взаимодействии, тем оно инертнее, значит тем больше его масса, и наоборот.

Гравитационные свойства массы. По теории Ньютона масса – источник силы всемирного тяготения:

$$F_T = G\frac{m_1 m_2}{r^2},$$

где m_1, m_2 – массы двух тел, r – расстояние между телами, G – гравитационная постоянная.

Из инерционных и гравитационных свойств следует, что ускорение свободного падения не зависит от массы падающего тела и его других характеристик (объема, плотности и т.д.). Эту закономерность называют равенством инертной и гравитационной масс. На самом деле речь идет об одной и той же массе – физической величине, которая является источником двух физических явлений – инерции и гравитации.

В классической физике масса является мерой количества вещества., содержащегося в теле. Здесь справедлив закон сохранения массы: масса изолированной системы тел не меняется со временем и равна сумме составляющих ее масс тел.

Скорость характеризует быстроту любых изменений в окружающем мире. Распространение звука или света в воздухе, движение облаков, испарение воды, полет птиц, движение пешеходов по улице – все явления характеризуются определенно скоростью.

Скорость – векторная физическая величина, характеризующая не только быстроту перемещения тела, но и направление его движения.

Скоростью точки называется предел отношения перемещения $\Delta\vec{r}$ к промежутку времени Δt, в течение которого это перемещение произошло, при стремлении Δt к нулю:

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}.$$

Такое определение скорости называют также *мгновенной скоростью*. Оно справедливо и для любых видов движения. Вектор мгновенной скорости всегда направлен по касательной к траектории движения, указывая направление, по которому происходило бы движение тела, если бы с момента времени t на него прекратилось действие других тел.

Понятие *средней скорости* вводится для характеристики неравномерного движения (движения с переменной скоростью). Определяется она скалярно или векторно.

Когда средняя скорость тела $\upsilon_{ср}$ равна отношению всего пути Δs ко всему времени движения Δt, то

$$\upsilon_{ср} = \frac{\Delta s}{\Delta t}.$$

Здесь пройденный путь и время – скалярные величины, следовательно скорость тоже величина скалярная.

Когда средняя скорость тела равна отношению перемещения точки к промежутку времени, в течение которого это перемещение произошло, то

$$\vec{\upsilon}_{ср} = \frac{\Delta\vec{r}}{\Delta t}.$$

Здесь средняя скорость перемещения – векторная величина.

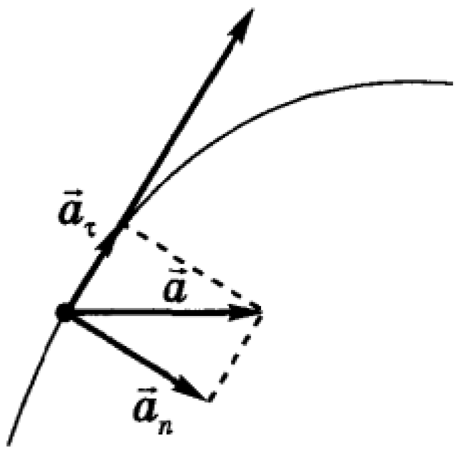
Для неравномерного криволинейного движения векторное определение средней скорости не всегда позволяет определить реальные скорости на пути движения тела. Например, при движении тела по замкнутой траектории в течение некоторого времени его перемещение равно нулю, хотя скорость была отлична от нуля. В таком случае лучше пользоваться скалярным определением скорости.

Ускорение – величина, характеризующая быстроту изменения скорости. Движение, как правило, неравномерно, т. е. непрерывно изменяется от одного момента времени к другому. Например, автобус, трогаясь с места, со временем набирает скорость, а приближаясь к остановке он замедляет свое движение. Для вычисления скорости в любой момент времени нужно знать, как она изменяется в единицу времени.

Рассмотрим такое неравномерное движение тела, при котором его скорость за любые равные промежутки времени будет изменяться одинаково. Такое движение называется равноускоренным.

Ускорением тела при его равноускоренном движении называют физическую величину, равную пределу отношения изменения скорости к промежутку времени, в течение которого это изменение произошло:

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}.$$



Ускорение, как представлено на рисунке, направлено в сторону вогнутости траектории. Его можно разложить на две составляющие: *тангенциальную* – по касательной к траектории движения, и *нормальную* – перпендикулярно траектории.

Следуя из этого, проекцию ускорения a_τ на касательную к траектории называют касательным (тангенциальным) ускорением, а проекцию a_n на нормаль – нормальным (центростремительным) ускорением.

Касательное (тангенциальное) ускорение характеризует изменение скорости по модулю при криволинейном движении:

$$a_\tau = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta v}{\Delta t}.$$

Нормальное ускорение характеризует изменение скорости по направлению и определяется формулой:

$$a_n = \frac{v^2}{R},$$

где R – радиус кривизны траектории в соответствующей ее точке.

При криволинейном движении полное ускорение складывается из тангенциального и нормального ускорений и определяется по формулой:

$$a = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2}.$$

При прямолинейном движении полное ускорение а равно тангенциальному $a = a_\tau$, поскольку $a_n = 0$.

В СИ единицей ускорения является ускорение, при котором скорость тела за каждую секунду изменяется на 1 метр в секунду. Единицу обозначают 1 м/с^2.

1.2. Основы динамики

К основным понятиям, используемым в динамике поступательного движения, относятся сила, масса тела, импульс тела (системы тел).

Силой называется векторная физическая величина, являющаяся мерой механического действия одного тела на другое. Механическое действие возникает как при непосредственном контакте взаимодействующих тел (трение, реакция опоры, вес и т.д.), так и посредством силового поля, существующего в пространстве (сила тяжести, кулоновские силы и т.д.). Сила характеризуется модулем, направлением и точкой приложения.

Сила трения возникает при непосредственном соприкосновении тел, препятствуя их относительному движению, и всегда направлена вдоль поверхности соприкосновения.

Силы трения имеют электромагнитную природу, как и силы упругости. Трение между поверхностями двух твердых тел называют сухим трением. Трение между твердым телом и жидкой или газообразной средой называют вязким трением.

Различают трение покоя, трение скольжения и трения качения.

Трение покоя – возникает не только при скольжении одной поверхности по другой, но и при попытках вызвать это скольжение. Трение покоя удерживает от соскальзывания находящиеся на движущейся ленте транспортера грузы, удерживает вбитые в доску гвозди и т. д.

Силой трения покоя называют силу, препятствующую возникновению движения одного тела относительно другого, всегда направленную против силы, приложенной извне параллельно поверхности соприкосновения, стремящейся сдвинуть предмет с места.

Чем больше сила, стремящаяся сдвинуть тело с места, тем больше сила трения покоя. Однако, для любых двух соприкасающихся тел она имеет некоторое максимальное значение $(F_{тр.п.})_{max}$, больше которого она быть не может, и которая не зависит от площади соприкосновения поверхностей:

$$(F_{тр.п.})_{max} = \mu_n N,$$

где μ_n – коэффициент трения покоя, N – сила реакции опоры.

Максимальная сила трения покоя зависит от материалов тел и от качества обработки соприкасающихся поверхностей.

Трение скольжения. Приложим к телу силу, превышающую максимальную силу трения покоя – тело сдвинется с места и начнет двигаться. Трение покоя сменится трением скольжения.

Сила трения скольжения также пропорциональна силе нормального давления и силе реакции опоры:

$$F_{тр} = \mu N.$$

Трение качения. Если тело не скользит по поверхности другого тела, а, подобно колесу, катится, то трение, возникающее в месте их контакта, называют трением качения. Когда колесо катится по полотну дороги, оно все время вдавливается в него, поэтому перед ним постоянно оказывается бугорок, которых необходимо преодолеть. Этим и обусловлено трение качения. Трение качения тем меньше, чем тверже дорога.

Сила трения качения также пропорциональна силе реакции опоры:

$$F_{тр.кач} = \mu_{кач} N,$$

где $\mu_{кач}$ – коэффициент трения качения.

Поскольку $\mu_{кач} << \mu$, при одинаковых нагрузках сила трения качения намного меньше силы трения скольжения.

Причинами возникновения силы трения являются шероховатость поверхностей соприкасающихся тел и межмолекулярное притяжение в местах контакта трущихся тел. В первом случае поверхности, кажущиеся гладкими, на самом деле имеют микроскопические неровности, которые при скольжении зацепляются друг за друга и мешают движению. Во втором случае притяжение проявляется даже при хорошо отполированных поверхностях.

Сила тяжести $F = mg$, где m - масса тела, g - ускорение силы тяжести. Заметим, что вес тела P - это сила, с которой тело действует на опору или подвес $P = m (g – a)$, где a - ускорение тела (и опоры) относительно Земли. Если $a = g$, то вес тела равен нулю $P = 0$ (состояние невесомости).

Упругая сила – сила, пропорциональная смещению точки из положения равновесия и направленная к положению равновесия. Примером такой силы может быть сила упругой деформации при растяжении (сжатии) пружины или стержня. В соответствии с законом Гука эта сила определяется так:

$$F_{упр.} = - k\cdot\Delta l,$$

где k - коэффициент жесткости пружины (стержня), Δl - величина упругой деформации. Знак минус означает, что противоположны направления смещения точки и силы упругости, возникающей при этом смещении и действующей на смещенную точку.

На движущееся в жидкости или газе твердое тело действует сила сопротивления среды, направленная против скорости тела относительно среды и тормозящая движение.

Сила сопротивления среды появляется только во время движения тела в этой среде. Здесь нет ничего подобного силе трения покоя. Наоборот, предметы в воде сдвигать намного легче, чем на твердой поверхности.

Импульсом тела называется величина, равная произведению массы тела на его скорость.

Следует помнить, что речь идет о теле, которое можно представить как материальную точку. Импульс тела *(p)* называют также количеством движения. Понятие количества движения было введено в физику Рене Декартом (1596-1650). Термин «импульс» появился позже (impulsus в переводе с латинского означает «толчок»). Импульс является векторной величиной (как и скорость) и выражается формулой:

$$\vec{p} = m\vec{v}.$$

Направление вектора импульса всегда совпадает с направлением скорости. За единицу импульса в СИ принимают импульс тела массой 1 кг, движущегося со скоростью 1 м/с, следовательно, единицей импульса является 1 кг· м/с.

1.3. Динамические характеристики вращательного движения. Момент силы. Момент импульса. Момент инерции

При поступательном движении системы все ее точки проходят одинаковые пути, имеют в данный момент времени одинаковые скорости и ускорения. При вращательном движения твердого тела все эти характеристики различны для разных точек вращающегося тела, поэтому и математическая форма 2-го закона Ньютона будет иной. При вращательном движении существенно изменяются сами понятия причины, вызывающей вращение, и величины, определяющей инертность тела.

При поступательном движении динамическими характеристиками являются сила, масса, импульс. При вращательном движении динамическими характеристиками являются момент силы, момент инерции, момент импульса. Эти характеристики можно рассматривать относительно точки вращения (полюса) и относительно оси вращения. В дальнейшем будем рассматривать эти характеристики относительно оси вращения. Определим эти характеристики.

Моментом силы F относительно оси вращения называется вектор M, равный векторному произведению радиус-вектора на вектор силы $M = [\, r \cdot F]$ и направленный по оси вращения в сторону, определяемую по правилу правого буравчика Модуль вектора момента силы равен $M = F \cdot r \cdot sin\alpha$, где α - угол между векторами r и F.

Моментом импульса материальной точки относительно оси вращения называется вектор L, равный векторному произведению радиуса-вектора r на вектор импульса P: $L = [\, r \cdot P] = [\, r \cdot mv]$, где m, v - соответственно масса и вектор скорости точки. Направление L определяется по правилу правого буравчика. Модуль вектора $L = mv \cdot r \cdot sin\alpha$, где α - угол между векторами r и v.

Моментом инерции материальной точки относительно оси вращения называется физическая величина, численно равная произведению массы точки на квадрат расстояния точки до оси вращения.

$$I = mr^2$$

Момент инерции - величина скалярная.

Моментом инерции механической системы относительно неподвижной оси называется физическая величина, равная сумме произведений масс всех точек системы на квадраты их расстояний до оси вращения.

$$I = \sum_{i=1}^{N} m_i \cdot r_i^2$$

Для твердого тела, разбитого на элементарные массы $\Delta\ m_i$, момент инерции относительно оси равен

$$I = \sum_{i=1}^{N} \Delta\ m_i \cdot r_i^2.$$

Моменты инерции тел правильной геометрической формы могут быть легко вычислены.

Для расчета моментов инерции вращающихся тел вокруг оси, не проходящей через центр масс тела, можно использовать *теорему Штейнера.*

Теорема Штейнера: момент инерции тела относительно произвольной оси АА' равен сумме момента инерции тела относительно оси ОО', проходящей через центр масс тела и параллельной данной оси АА', и произведения массы тела как целого на квадрат расстояния d между осями АА' и ОО'

1.4. Основное уравнение динамики вращательного движения

В разделе "Кинематика" при рассмотрении поступательного и вращательного движений мы показали, что кинематические уравнения обоих движений имеют одинаковый вид, но при поступательном движении мы используем линейные характеристики (путь, скорость, ускорение), а при вращательном - угловые характеристики (угловое перемещение, угловую скорость, угловое ускорение). Используем эту аналогию и в динамике. При поступательном движении уравнение второго закона Ньютона имеет вид

$$dP/dt = F.$$

Для вращательного движения: $dL/dt = M.$

Это уравнение называется уравнением моментов или основным законом вращательного движения. Вид уравнения не изменится и для системы материальных точек и для вращения твердого тела, только L определяется как момент импульса для системы точек.

Еще один вид уравнения второго закона Ньютона для вращательного движения имеет вид:

$$M \cdot dt = dL,$$

где величина $M\cdot dt$ называется импульс момента сил, а dL - изменение момента импульса системы.

1.5 Закон сохранения момента импульса

Обратимся к уравнению моментов $dL/dt = M$, где M - главный вектор момента внешних сил.

Если M = 0, то и $L = const$.

Если относительно некоторой точки О выбранной системы отсчета момент всех сил, действующих на систему материальных точек, равен нулю, то относительно этой точки вектор момента импульса системы не изменяется с течением времени (закон сохранения момента импульса относительно полюса).

Примеры.

а) Человек стоит на скамье Жуковского, представляющей массивный, диск, который может вращаться вокруг оси, проходящей через его центр, с пренебрежимо малым трением. Момент импульса системы "человек - диск" равен нулю. Человек начинает идти вдоль обода диска. Диск начинает вращаться в обратную ходу человека сторону.

б) Фигурист выполняет "волчок", его руки раскинуты в стороны, его момент инерции относительно вертикальной оси вращения I_1, угловая скорость ω_1. Затем он резко прижимает руки к груди, его момент инерции уменьшается и становится I_2, а угловая скорость ω_2 увеличивается. При этом выполняется закон сохранения момента импульса относительно вертикальной неподвижной оси, проходящей через линию симметрии тела фигуриста $I_1\cdot \omega_1 = I_2\cdot\omega_2$.

1.6 Работа и механическая энергия. Мощность

Работа постоянной и переменной силы. Мощность. Потенциальные (консервативные) и непотенциальные силы

В физике работа неразрывно связана с изменением состояния тела или системы. Это изменение может выражаться самым различным образом: а) тело приобретает другую скорость, б) тело поднимается на другой уровень, в) тело деформируется, г) тело заряжается, д) тела намагничивается и т.д. Состояние механической системы (или тела) характеризуется одновременным заданием координат и скоростей всех точек системы (или тела) и может изменяться в процессе движения.

Процесс изменения характера движения тела происходит при его силовом взаимодействии с другими телами. Для количественного описания процесса вводят понятия силы и работы, совершаемой силой.

Если на тело действует постоянная сила F, и это приводит к перемещению Δr тела, то элементарной работой ΔA постоянной силы называется скалярное произведение вектора силы F и вектора перемещения Δr:

$$\Delta A = (F \cdot \Delta r) = ½\ F½½\Delta\ r½\ cos\ a\ ,$$

где a - угол между направлениями векторов силы F и перемещения Δr, $(F \cdot \Delta r)$ – скалярное произведение двух векторов

Энергия. Наиболее общим определением понятия энергии можно считать то, которое связано с понятием состояния системы (или тела). Энергия всегда является функцией состояния системы (тела). В любом состоянии система имеет определенное значение энергии и может сохранять это состояние, а значит и энергию этого состояния, сколь угодно долго. Для перехода системы (тела) в другое состояние должна быть совершена работа.

Физическая величина, характеризующая способность тела или системы тел совершить работу, называется *энергией.*

Состояние системы (тела) может меняться в процессе движений. Формы движений в природе различны. Для количественного сравнения разных форм движений и служит понятие энергии. Поэтому можно дать другое определение для энергии.

Энергией называется физическая величина, являющаяся общей мерой различных форм движения материи.

Различают виды энергии механическую, внутреннюю, электромагнитную, химическую, ядерную и т.д.

Механическая энергия может быть обусловлена или движением тела с некоторой скоростью (кинетическая энергия), или расположением данного тела в системе других тел определенной конфигурации (потенциальная энергия)

$$W_{мех.} = W_{кин.} + W_{пот.}.$$

Кинетическая энергия

Кинетической энергией тела называется энергия его механического движения.

Изменение кинетической энергии тела под действием силы равно работе этой силы.

Физическая величина

$$W_{кин.} = \frac{mv^2}{2}$$

называется кинетической энергией, а величина

$$\Delta W_{кин.} = \frac{m{v_2}^2}{2} - \frac{m{v_1}^2}{2},$$

равная разности кинетических энергий конечного состояния системы (индекс 2) и начального состояния (индекс 1), называется приращанием кинетической энергии.

Если на тело действуют несколько сил, и каждая из них совершает работу, и в результате этого меняется кинетическая энергия тела, то полная работа равна алгебраической сумме работ всех сил, действующих на тело. Энергия тела меняется за счет совершения работы.

Итак, связь работы и кинетической энергии задается соотношением:

$$A_{всех\ сил} = \Delta\ W_{кин} = (\ W_{кин})_{кон.} - (\ W_{кин.})_{\ нач.},$$

т.е. работа всех сил равна изменению кинетической энергии тела (или системы).

Работа - мера изменения энергии (физический смысл работы).

Кинетическая энергия вращающегося тела.

Твердое тело вращается вокруг неподвижной оси. Полная кинетическая энергия вращающегося тела равна:

$$W_{кин.вращ.} = \frac{I\omega^2}{2},$$

где I - момент инерции тела относительно оси вращения.

Потенциальная энергия - энергия, определяемая взаимным расположением тел или отдельных частей тела относительно друг друга.

Когда меняется конфигурация системы тел или частиц одного тела относительно друг друга, должна совершаться работа.

Пространство, в каждой точке которого на тело действует определенная сила, называется физическим или силовым полем.

Поэтому когда тело перемещается вблизи Земли, то говорят, что тело двигается в силовом поле тяготения Земли или в потенциальном поле Земли. Потенциальная энергия тяготения равна

$$(W_{пот})_{тяг.} = mgh,$$

h - расстояние между телом и Землей.

В растянутой (или сжатой) пружине на каждую ее точку действует сила упругости, в этом случае можно говорить о потенциальном поле упругости. Потенциальная энергия упругости равна $(W_{пот})_{упр.} = (kl^2)/2$, l - длина растянутой пружины, отсчет х от положения равновесия.

При делении сил, действующих на тело, на внешние и внутренние рассмотренные в примерах сила тяготения (в системе "тело - Земля") и сила упругости растянутой (сжатой) пружины можно отнести к внутренним силам. Поэтому верно утверждение, что каждой конфигурации произвольной системы частиц присуща своя собственная потенциальная энергия, и работа всех внутренних потенциальных сил, приводящая к изменению этой конфигурации, равна взятому со знаком минус приращению (убыли) потенциальной энергии системы.

Работа силы, совершаемая в единицу времени, называется *мощностью*. Мощность N это физическая величина, равная отношению работы A к промежутку времени t, в течение которого совершена эта работа:

$$N = \frac{A}{t}$$

В Международной системе (СИ) единица мощности называется ватт (Вт). Ватт равен мощности силы, совершающей работу в 1 Дж за время 1 с.

$$1\text{Вт} = \frac{1\text{Дж}}{1\text{с}}$$

1.7 Закон сохранения механической энергии системы

Закон сохранения механической энергии это фундаментальный закон природы, установленный эмпирически и заключающийся в том, что для изолированной физической системы может быть введена скалярная физическая величина, являющаяся функцией параметров системы и называемая энергией, которая сохраняется с течением времени. Поскольку закон сохранения энергии относится не к конкретным величинам и явлениям, а отражает общую, применимую везде и всегда закономерность, его можно именовать не законом, а принципом сохранения энергии.

С фундаментальной точки зрения, согласно теореме Нётер, закон сохранения энергии является следствием однородности времени, то есть независимости законов физики от момента времени, в который рассматривается система. В этом смысле закон сохранения энергии является универсальным, то есть присущим системам самой разной физической природы. При этом выполнение этого закона сохранения в каждой конкретно взятой системе обосновывается подчинением этой системы своим специфическим законам динамики, вообще говоря, различающимся для разных систем.

В различных разделах физики по историческим причинам закон сохранения энергии формулировался независимо, в связи с чем были введены различные виды энергии. Возможен переход энергии из одного вида в другой, но полная энергия системы, равная сумме отдельных видов энергий, сохраняется. Однако, из-за условности деления энергии на различные виды, такое деление не всегда может быть произведено однозначно.

1) Приращение кинетической энергии системы равно произведенной работе всех сил, приложенных к системе.

$$A_{всех\ сил} = \Delta\ W_{кин} = (\ W_{кин})_{кон.} - (\ W_{кин.})_{\ нач.}$$

2) Все силы, действующие на систему можно разделить на внешние и внутренние. Внутренние силы можно разделить на потенциальные и непотенциальные (к последним относятся силы трения и сопротивления). Тогда

$$A_{всех\ сил} = A_{внеш.} + .A_{пот.} + A_{тр.}$$

3) Работа потенциальных внутренних сил равна приращению потенциальной энергии системы, взятому со знаком минус.

1.8 Колебательное движение

Движения, обладающие той или иной степенью повторяемости, называются *колебаниями.*

Если значения физических величин, изменяющихся в процессе движения, повторяются через равные промежутки времени, то такое движение называется *периодическим.* В зависимости от физической природы колебательного процесса различают механические и электромагнитные колебания. По способу возбуждения колебания делят на: *свободные* (собственные), происходящие в представленной самой себе системе около положения равновесия после какого-либо первоначального воздействия; *вынужденные* – происходящие при периодическом внешнем воздействии.

Условия возникновения свободных колебаний: а) при выведении тела из положения равновесия в системе должна возникнуть сила, стремящаяся вернуть его в положение равновесия; б) силы трения в системе должны быть достаточно малы.

Простейшим типом колебаний являются гармонические колебания — колебания, при которых колеблющаяся величина изменяется со временем по закону синуса (косинуса). Исследование гармонических колебаний важно по двум причинам: 1) колебания, которые встречаются в природе и технике, часто имеют близкий к гармоническому характер ; 2) различные периодические процессы (процессы, которые повторяются через равные промежутки времени) можно представить как суперпозицию (наложение) гармонических колебаний. Гармонические колебания некоторой величины s описываются уравнением вида

$$s = A\cos(\omega_0 t + \varphi)$$

где ω_0 — круговая (циклическая) частота, A - максимальное значение колеблющейся величины, называемое амплитудой колебания, φ — начальная фаза колебания в момент времени $t=0$, $(\omega_0 t+\varphi)$ - фаза колебания в момент времени t. Фаза колебания есть значение колеблющейся величины в данный момент времени. Так как косинус имеет значение в пределах от +1 до –1, то s может принимать значения от $+A$ до $–A$.

Определенные состояния системы, которая совершает гармонические колебания, повторяются через промежуток времени T, имеющий название период колебания, за который фаза колебания получает приращение (изменение) 2π, т. е. $\omega_0(t+T)+\varphi = (\omega_0 t+\varphi)+2\pi$, откуда

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0}.$$

Для того чтобы понять, меняются ли скорость и ускорение при колебаниях, обратимся к математическому маятнику.

Маятник вывели из положения равновесия, и он начинает совершать колебания. В крайних точках колебания скорость меняет свое направление, причем в точке равновесия скорость максимальная. Если меняется скорость, значит, у тела есть ускорение. Будет ли такое движение равноускоренным? Конечно, нет, так по мере увеличения (уменьшения) скорости меняется и ее направление. Это значит, что ускорение также будет меняться. Наша задача – получить законы, по которым будут меняться проекция скорости и проекция ускорения со временем.

Координата со временем меняется по гармоническому закону, по закону синуса или косинуса. Логично предположить, что скорость и ускорение также будут меняться по гармоническому закону.

Закон изменения координаты:

$$x(t) = x_m sin\omega t$$

Закон, по которому будет меняться проекция скорости со временем:

$$v_x(t) = v_{x_m} cos\omega t$$

Данный закон также является гармоническим, но если координата меняется со временем по закону синуса, то проекция скорости – по закону косинуса. Координата в положении равновесия равна нулю, скорость же в положении равновесия максимальная. И наоборот, там, где координата максимальная, скорость равна нулю.

Закон, по которому будет меняться проекция ускорения со временем:

$$a_x(t) = -a_{x_m} cos\omega t$$

Знак минус появляется, поскольку при приращении координаты возвращающая сила направлена в противоположную сторону. По второму закону Ньютона, ускорение направлено туда же, куда и результирующая сила. Итак, если координата растет, ускорение растет по модулю, но противоположно по направлению, и наоборот, о чем и говорит знак минус в уравнении.

1.9 Затухающие колебания и их характеристики

Затуханием колебаний называется постепенное уменьшение амплитуды колебаний с течением времени, обусловленное потерей энергии колебательной системой.

Собственные колебания без затухания – это идеализация. Причины затухания могут быть разные. В механической системе к затуханию колебаний приводит наличие трения. В электромагнитном контуре к уменьшению энергии колебаний приводят тепловые потери в проводниках, образующих систему. Когда израсходуется вся энергия, запасенная в колебательной системе, колебания прекратятся. Поэтому амплитуда *затухающих колебаний* уменьшается, пока не станет равной нулю.

Затухающие колебания, как и собственные, в системах, разных по своей природе, можно рассматривать с единой точки зрения – общих признаков. Однако, такие характеристики, как амплитуда и период, требуют переопределения, а другие – дополнения и уточнения по сравнению с такими же признаками для собственных незатухающих колебаний. Общие признаки и понятия затухающих колебаний следующие:

Дифференциальное уравнение должно быть получено с учетом убывания в процессе колебаний колебательной энергии.

Уравнение колебаний – решение дифференциального уравнения.

Амплитуда затухающих колебаний зависит от времени.

Частота и период зависят от степени затухания колебаний.

Фаза и начальная фаза имеют тот же смысл, что и для незатухающих колебаний.

Уравнение затухающих колебаний есть решение такого дифференциального уравнения:

$$x = A \cdot e^{-\beta t} \cdot \cos(\omega_{зат.} t + \alpha) \quad x = A \cdot e^{-\beta t} \cdot \sin(\omega_{зат.} t + \alpha_1).$$

Частота затухающих колебаний:

$\omega_{зат.} = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$ (физический смысл имеет только вещественный корень, поэтому $\beta \le \omega_0$).

Период затухающих колебаний:

$$T_{зат.} = \frac{2\pi}{\omega_{зат.}} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^{\,2} - \beta^2}}.$$

Амплитуда затухающих колебаний:

$$A_{зат.} = Ae^{-\beta t}$$

Промежуток времени τ, за который амплитуда уменьшается в "е" раз, называется *временем релаксации*.

Коэффициент затухания β – величина, обратно пропорциональная времени релаксации.

Логарифмический декремент затухания δ - физическая величина, численно равная натуральному логарифму отношения двух последовательных амплитуд, отстоящих по времени на период.

$$\delta = \ln\frac{A_{зат.}(t)}{A_{зат.}(t+T)} = \ln\frac{A_{зат.}e^{-\beta t}}{A_{зат.}e^{-\beta(t+T)}} = \beta T_{зат.}$$

Если затухание невелико, т.е. величина β мала, то амплитуда незначительно изменяется за период, и логарифмический декремент можно определить так:

$$\delta = \frac{1}{N}\ln\frac{A_{зат.}(t)}{A_{зат.}(t+NT)},$$

где $A_{зат.}(t)$ *и* $A_{зат.}(t+NT)$ – амплитуды колебаний в момент времени *e* и через *N* периодов, т.е. в момент времени $(t + NT)$.

2. ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕРМОДИНАМИКИ

Молекулярная физика и термодинамика - разделы физики, в которых изучаются макроскопические процессы в телах, связанные с огромным числом содержащихся в телах атомов и молекул.

Молекулярная физика представляет собой раздел физики, изучающий строение и свойства веществ, исходя из так называемых молекулярно-кинетических представлений. Согласно этим представлениям:

1. Любое тело - твердое, жидкое или газообразное состоит из большого количества весьма малых обособленных частиц-молекул.

2. Молекулы всякого вещества находятся в бесконечном хаотическом движении (например, броуновское движение).

3. Используется идеализированная модель идеального газа, согласно которой:

а). Собственный объем молекул газа пренебрежимо мал по сравнению с объемом сосуда (разреженность).

б). Между молекулами отсутствуют силы взаимодействия.

в). Столкновение молекул газа между собой и со стенками сосуда абсолютно упругие.

4. Макроскопические свойства тел (давление, температура и др.) описываются с помощью статистических методов, основным понятием которых является статистический ансамбль, т.е. описывается поведения большого числа частиц через введение средних характеристик (средняя скорость, энергия) всего ансамбля, а не отдельной частицы.

Термодинамика в отличие от молекулярно-кинетической теории изучает макроскопические свойства тел, не интересуясь их макроскопической картиной.

Термодинамика - раздел физики, изучающий общие свойства макроскопических систем, находящихся в состоянии термодинамического равновесия, и процессы перехода между этими состояниями.

В основе термодинамики лежат 3 фундаментальных закона, называемых началами термодинамики, установленных на основании обобщения большой совокупности опытных фактов.

Молекулярно-кинетическая теория и термодинамика взаимно дополняют друг друга, образуя единое целое, но отличаясь различными методами исследования.

Термодинамическая система - совокупность макроскопических тел, которые взаимодействуют и обмениваются энергией как между собой, так и с другими телами. Состояние системы задается термодинамическими параметрами - совокупность физических величин, характеризующих свойства термодинамической системы, обычно в качестве параметров состояния выбирающих температуру, давление и удельный объем.

Температура - физическая величина, характеризующая состояние термодинамического равновесия макроскопической системы. [T] = K - термодинамическая шкала, [t] = °C – международная практическая шкала. Связь термодинамической и м/н практической температуры: T = t + 273, например, при t = 20 °C, T = 293 K.

Удельный объём - это объём единицы массы. Когда тело однородно т.е. ρ = *const*, то макроскопические свойства однородного тела могут характеризовать объём тела V.

2.1 Статистический и термодинамический подходы

Существует два метода исследований**:**

1) статистический метод основан на том, что свойства макросистем, состоящих из большого числа микрочастиц, определяются усреднёнными значениями характеристик этих микрочастиц (например, скоростей, энергий);

2) термодинамический. Термодинамика изучает общие свойства макросистем, находящихся в состоянии термодинамического равновесия, и процессы перехода между состояниями. Система – это любая мысленно выделенная совокупность тел. Окружающая среда – это всё, что не входит в систему. В основе термодинамики лежат 3 закона (начала) термодинамики, основанных на опыте. Для определения состояния системы в термодинамике используются параметры (термодинамические переменные) – давление, объём, температура, масса. Параметры, зависящие от количества вещества в системе, называются *экстенсивными***, –** это объём V, масса m, количество вещества (число молей), энергия. Эти параметры аддитивны, например, масса системы

равна сумме масс всех её частей. Параметры, не зависящие от количества вещества в системе, называются *интенсивными*, – это температура T, давление p.

Массу молекул принято выражать в относительных молекулярных единицах. За стандарт принята масса изотопа углерода ^{12}C. Считается, что молекулярная масса углерода равна 12 атомным единицам. Тогда *молекулярной массой вещества* называется отношение массы молекулы этого вещества к 1/12 массы атома углерода ^{12}C. Таким образом, молекулярная масса – величина безразмерная. Количество вещества, в котором содержится количество молекул, равное числу атомов в 0,012 *(кг)* изотопа углерода ^{12}C, *называется молем вещества*. Число молекул, которое содержится в 1 *(моле)*, называется *числом Авогадро*, и оно равно: $N_A = 6{,}022\cdot 10^{23}$ *(моль*$^{-1}$*)*. Массу одного моля называют *молярной массой* M, это величина размерная – *(кг/моль)*. Например, молярная масса кислорода (O_2) равна 0,032 *(кг/моль)*, углерода – 0,012 *(кг/моль)*. Очевидно, что молярная масса равна произведению числа Авогадро на массу одной молекулы m_0:

$$M = N_A m_0$$

2.2 Уравнение состояния идеального газа

Пусть газ массой m занимает объем V при температуре T и давлении p, а M- молярная масса газа. По определению, концентрация молекул газа: $n = N/V$, где N-число молекул.

$$N = \frac{m}{M} N_A \Rightarrow n = \frac{mN_A}{VM}$$

Подставим это выражение в основное уравнение молекулярно-кинетической теории:

$$p = nkT = \frac{mN_A}{VM} kT \Rightarrow pV = \frac{m}{M} kN_A T$$
$$R = kN_A = 8{,}31\ Дж/(моль\cdot K)$$

Величину R называют универсальной газовой постоянной, а уравнение, записанное в виде

$$pV = \frac{m}{M} RT \text{ или } pV = \nu RT$$

называют *уравнением состояния идеального газа* или уравнением *Менделеева-Клапейрона.* Нормальные условия - давление газа равно атмосферному (p = 101,325 кПа) при температуре таяния льда (T = 273,15 K).

2.3 Опытные газовые законы

1. Изотермический процесс

Процесс изменения состояния термодинамической системы при постоянной температуре называют *изотермическим.*

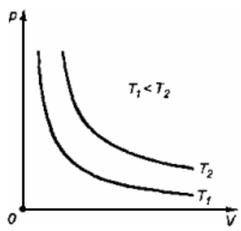
Если T =const, то

$$pV = \frac{m}{M}RT \Rightarrow pV = const$$

Закон Бойля-Мариотта

Для данной массы газа произведение давления газа на его объем постоянно, если температура газа не меняется: $p_1V_1=p_2V_2$ при $T = const$

График процесса, происходящего при постоянной температуре, называется изотермой.



2. *Изобарный процесс*

Процесс изменения состояния термодинамической системы при постоянном давлении называют *изобарным.*

Если $p = const$, то $pV = \frac{m}{M}RT \Rightarrow \frac{V}{T} = const$

Закон Гей-Люссака

Объем данной массы газа при постоянном давлении прямо пропорционален абсолютной температуре:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad \text{при } p = const$$

Если газ, имея объем V_0 находится при нормальных условиях: $T_0 = 273\ K,\ p \approx 10^5\ Па,$ а затем при постоянном давлении переходит в состояние с температурой T и объемом V, то можно записать

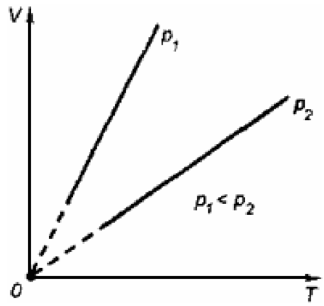
$$\frac{p_0}{T_0} = \frac{p}{T} \Rightarrow p = p_0 \cdot \frac{T}{T_0}$$

Обозначив

$$\alpha = \frac{1}{T_0} = \frac{1}{273} K^{-1}$$

получим $V=V_0\alpha T$

Коэффициент α называют температурным коэффициентом объемного расширения газов. График процесса, происходящего при постоянном давлении, называется *изобарой*.



3. *Изохорный процесс*

Процесс изменения состояния термодинамической системы при постоянном объеме называют изохорным. Если $V = const$, то

$$pV = \frac{m}{M} RT \Rightarrow \frac{P}{T} = const$$

Закон Шарля

Давление данной массы газа при постоянном объеме прямо пропорционально абсолютной температуре:

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \text{ при } V = const$$

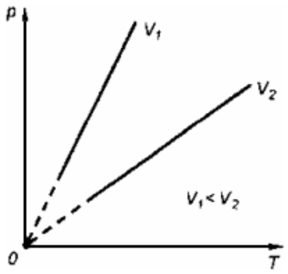
Если газ, имея объем V_0,находится при нормальных условиях:

$$T_0 = 273\ K,\ p \approx 10^5\ Па,$$

а затем, сохраняя объем, переходит в состояние с температурой T и давлением p, то можно записать

$$\frac{p_0}{T_0} = \frac{p}{T} \Rightarrow p = p_0 \cdot \frac{T}{T_0}$$

График процесса, происходящего при постоянном объеме, называется *изохорой*.



2.4 Основное уравнение МКТ

Давление есть следствие ударов молекул о стенку сосуда, очевидно, что его величина должна зависеть от характеристик отдельно взятых молекул (от средних характеристик, конечно, Вы ведь помните про то, что скорости всех молекул различны). Эта зависимость выражается *основным уравнением молекулярно-кинетической теории идеального газа:*

$$p = \frac{1}{3} n m_0 v_{кв}^2$$

где: p - давление газа, n - концентрация его молекул, m_0 - масса одной молекулы, $v_{кв}$ - средняя квадратичная скорость (обратите внимание, что в самом уравнении стоит квадрат средней квадратичной скорости). Физический смысл этого уравнения состоит в том, что оно устанавливает связь между характеристиками всего газа целиком (давлением) и параметрами движения отдельных молекул, то есть связь между макро- и микромиром.

Для идеального газа *средняя квадратичная скорость* движения молекул газа:

$$v_{кв} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} \qquad v_{кв} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$$

где: $k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана, T – абсолютная температура.

$R = 8{,}31$ Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная. Следующей важной формулой является формула для средней кинетической энергии поступательного движения молекул газа:

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{3}{2} kT$$

2.5 Распределение Максвелла

Теоретическую задачу о распределении молекул идеального газа по скоростям впервые решил английский ученый Максвелл. Он рассматривал газ как замкнутую систему, содержащую *N* молекул в отсутствие внешних сил и в состоянии термодинамического равновесия. Вследствие непрерывного изменения скоростей имеет смысл говорить только о числе молекул, скорости которых заключены в определенном интервале скорости. Относительную долю таких молекул будет пропорциональна ширине выбранного интервала скорости

$$\frac{dN}{N} = f(v)dv$$

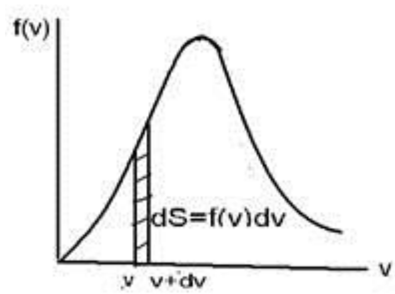
Коэффициент пропорциональности, зависящий от скорости, называется функцией распределения молекул по скоростям

$$f(v) = \frac{dN}{Ndv}$$

Смысл функции распределения: она выражает долю молекул, скорости которых заключены в единичном интервале скорости. Применяя статистические методы Максвелл нашел функцию - закон распределения молекул идеального газа по скоростям

$$f(v) = 4\pi\left(\frac{m_0}{2\pi kT}\right)^{\frac{3}{2}} v^2 e^{-\frac{m_0 v^2}{2kT}}$$

На рисунке представлен график функции распределения скоростей молекул в газах.



Площадь заштрихованной полоски, заключенной в интервале скорости от v до $v+dv$ выражает относительное число молекул, скорости которых лежат в этом интервале скоростей. Вся площадь под кривой равна единице. Значит, функция удовлетворяет условию нормировки

$$\int_0^\infty f(v)dv = 1$$

Этот интеграл выражает всю площадь, заключенную под кривой функции распределения молекул по скоростям. С повышением температуры максимум этой кривой смещается в сторону большей температуры, изменяется и ее форма, растягиваясь в сторону более высоких температур.

Из этой формулы следует, что с повышением температуры максимум кривой распределения скоростей смещается вправо и кривая растягивается в сторону более высоких скоростей. Однако площадь, заключенная под кривой остается неизменной. Значение функции распределения молекул по скоростям заключается в том, что с ее помощью определяются средние значения величин, характеризующих всю совокупность молекул.

При получении функции распределения Максвелла, предполагалось, что внешние силы на молекулы газа не действуют и поэтому молекулы распределены по объему равномерно и давление газа во всех частях его объема одинаково. Если газ находится в каком-либо силовом поле, распределение его молекул по объему уже не будет равномерным. В качестве такого распределения рассмотрим распределение давления и молекул воздуха в поле земного тяготения.

2.6 Распределение Больцмана

Давление земной атмосферы обусловлено силой притяжения молекул воздуха к Земле. Обозначим давление воздуха на высоте h через p. Тогда давление на высот $h+dh$ равно $p+dp$. Причем $dh>0$, а $dp<0$. Отсюда имеем

$$p-(p+dp)=\rho g dh$$

bли

$$dp=-\rho g dh$$

где ρ - плотность газа. Из уравнения состояния идеального газа имеем

$$\rho=\frac{pM}{ET}$$

имеем

$$\ln p=-\frac{Mgh}{RT}+\ln C$$

Потенцируя последнее выражение с учетом значения *C*, имеем

$$p = p_0 e^{-\frac{Mgh}{RT}}$$

Эту формулу называют барометрической формулой.

Эту формулу используем для получения распределения молекул в поле потенциальных сил.

$$n = n_0 e^{-\frac{m_0 gh}{kT}}$$

На разных высотах молекулы обладают разной потенциальной энергией.

Отсюда следует, что распределение молекул по высоте это есть распределение по потенциальным энергиям.

Больцман показал, что такое распределение справедливо не только в поле земного тяготения, но и в любом потенциальном поле. Поэтому такое распределение получило название распределения Больцмана.

2.7 Явления переноса в газах

Равновесное состояние газа в молекулярно-кинетической теории рассматривается как состояние полной хаотичности движения молекул, распределение которых по скоростям подчиняется закону Максвелла. Любое неравновесное состояние газа всегда связано с нарушением полной хаотичности движения. Основной особенностью неравновесных состояний является стремление газа самопроизвольно переходить в равновесное состояние. Это обусловлено хаотическим движением молекул и непрерывными столкновениями их друг с другом что приводит к постоянному перемешиванию молекул, изменению их скоростей и энергии.

Установление в газе максвелловского распределения молекул по скоростям при переходе его в равновесное состояние всегда связано с направленным переносом массы, импульса и энергии, что позволило объединить соответствующие процессы общим названием - явления переноса.

К явлениям переноса относят *диффузию* (перенос массы), *внутреннее трение*, или вязкость (перенос импульса) и *теплопроводность* (перенос энергии в форме теплоты).

Диффузия - это явление самопроизвольного взаимного проникновения и перемешивания частиц двух соприкасающихся газов, жидкостей или твердых тел.

Экспериментально установлено, что перенос массы газа подчиняется *закону Фика:*

$$dM = -D\frac{d\rho}{dx}dSdt,$$

где dM - масса газа, переносимого за время dt через элементарную площадку dS, расположенную перпендикулярно к оси X, вдоль, которой осуществляется перенос; D - коэффициент диффузии, зависящий от природы диффундирующего газа и условий, в которых он находится.

Знак минус в выражении указывает на то, что перенос массы при диффузии осуществляется в направлении убывания плотности, то есть вдоль положительного направления оси X при $\frac{d\rho}{dx} < 0$ и в обратном направлении при $\frac{d\rho}{dx} > 0$.

Внутреннее трение - это явление возникновения сил трения между параллельными слоями газа или жидкости, движущимися друг относительно друга и с разными скоростями.

Экспериментально установлен закон *(закон Ньютона),* в соответствии с которым модуль силы внутреннего трения $d\vec{F}$, действующей на элемент поверхности слоя площадью dS, определяется выражением

$$dF = \eta\left|\frac{du}{dx}\right|dS$$

где du/dx - градиент скорости направленного движения слоев; η - коэффициент внутреннего трения (или динамический коэффициент вязкости), зависящий от природы газа.

На практике используется и так называемый *кинематический коэффициент вязкости* ν, связанный с динамическим коэффициентом вязкости η и плотностью газа ρ выражением:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}.$$

Теплопроводность - это явление переноса энергии в форме теплоты при наличии в веществе разности температур в некотором направлении.

Экспериментально доказано, что такой перенос энергии подчиняется следующему закону *(закону Фурье):*

$$dQ = -K\frac{dT}{dx}dSdt,$$

где dQ - количество теплоты (мера энергии), переносимой за время dt через элементарную площадку dS, перпендикулярную оси X; dT/dx - градиент температуры; K - коэффициент теплопроводности, зависящий от природы газа и тех условий, при которых он находится.

Знак минус в выражении указывает на то, что в процессе теплопроводности энергия переносится в направлении убывания температур.

Коэффициент теплопроводности численно равен удельному тепловому потоку при быстроте изменения температуры, равной единице.

$$K = \frac{1}{3} < V >< \lambda > \rho C_V$$

2.8 Внутренняя энергия идеального газа

Термодинамика в отличие от молекулярно-кинетической теории, изучает физические свойства макроскопических тел (термодинамических систем), не вникая в их молекулярное строение. Термодинамический метод базируется на законе сохранения и превращении энергии.

Физические величины, характеризующие термодинамическую систему, называются *термодинамическими параметрами*. К ним относятся: объем, давление, температура, концентрация и др. Любое изменение в термодинамической системе, связанное с изменением ее параметров, называется *термодинамическим процессом*, а уравнение, связывающее между собой параметры системы, называется *уравнением состояния*. Примером такого уравнения является уравнение Менделеева – Клапейрона.

Важнейшей характеристикой термодинамической системы является ее *внутренняя энергия* U, складывающая из потенциальной энергии взаимодействия частиц системы и кинетической энергии их теплового движения.

Внутренняя энергия является функцией состояния системы, т.е. в каждом состоянии система обладает вполне определенным значением внутренней энергии, не зависящим от того, каким путем система перешла в это состояние.

$$U = \nu\frac{i}{2}RT = \frac{m}{\mu}\frac{i}{2}RT$$

Следовательно, внутренняя энергия газа пропорциональна его массе, числу степеней свободы молекулы и абсолютной температуре газа.

2.9 Первый закон термодинамики

Внутреннюю энергию термодинамической системы можно изменить за счет работы, которую либо внешние тела совершают над ней, либо сама система совершает над внешними телами. Например, приложив внешнюю силу, мы сжимаем газ, в результате чего его температура повышается, а, следовательно, увеличивается и внутренняя энергия. Внутреннюю энергию можно изменить также, передавая системе (или отнимая у нее) некоторое количество теплоты.

Согласно закону сохранения энергии, изменение внутренней энергии системы должно равняться сумме полученной ею теплоты и совершенной над ней работы. Эта формулировка закона сохранения энергии применительно к термодинамическим системам носит название *первого закона термодинамики:*

$$\Delta U = Q - A$$

или

$$Q = \Delta U + A$$

Условимся считать, что теплота положительна Q>0 тогда, когда она сообщается системе, а работа положительна, когда система совершает ее над внешними телами.

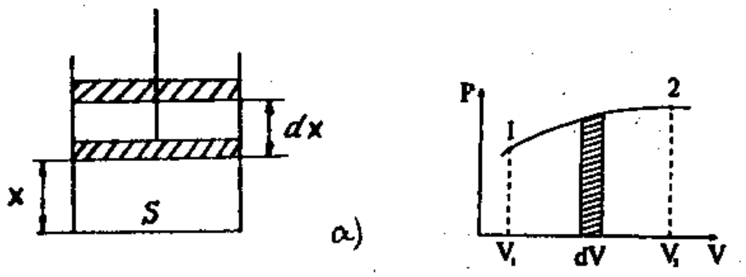
В дифференциальной форме первый закон термодинамики имеет вид:

$$dQ=dU+dA$$

Необходимо подчеркнуть, что в отличие от внутренней энергии, являющейся функцией состояния, работа и количество теплоты зависят не только от начального и конечного состояний системы, но и от пути, по которому происходило изменение ее состояния. Следовательно, величины dQ и dA не являются полными дифференциалами, по которым может производиться интегрирование. Тогда первый закон примет вид:

$$\delta Q=dU+\delta A$$

Найдем в общем виде работу, совершаемую газом. Если газ, расширяясь, перемещает поршень на расстояние dx, то он производит работу



$$\delta A = F\cdot dx = P\cdot S\cdot dx = PdV,$$

где S– площадь поршня; $Sdx=dV$– изменение объема газа в цилиндре.

Полная работа, совершаемая газом при изменении его объема от V_1 доV_2, равна:

$$A = \int_{V_1}^{V_2} PdV \qquad\qquad A = \int_{T_1}^{T_2} \nu RdT$$

Графически процесс изменения состояния газа при его расширении изображается участком кривой 1-2 в координатах P – V. Точки 1 и 2 соответствуют начальному и конечному состояниям газа. Элементарная работа PdV изображается заштрихованной площадью.

2.10 Теплоемкость идеальных газов.

Количество тепла, которое надо сообщить телу, чтобы изменить его температуру на 1 К, называется *теплоемкостью* тела С.

Согласно этому определению

$$C = \frac{\delta Q}{dT}, \ [C] = Дж/К$$

Теплоемкость единицы массы вещества называется удельной теплоемкостью $C_{уд}$

$$C_{уд} = \frac{\delta Q}{mdT} \quad \left[C_{уд}\right] = \frac{Дж}{кг\cdot К}$$

Теплоемкость одного моля называется *молярной теплоемкостью* $C_м$.

$$C_м = \frac{\delta Q}{\nu dT} = \frac{\mu}{m}\cdot\frac{\delta Q}{dT}, \ [C_м] = Дж/моль\cdot К$$

где $\nu = m/\mu$– число молей.

Удельная теплоемкость связана с молярной соотношением:

$$C_м = C_{уд}\cdot \mu$$

Теплоемкость газа зависит от того, при каких условиях она определяется: при постоянном объеме или постоянном давлении.

Если газ нагревается при постоянном объеме (изохорный процесс), то $dV=0$ и работа $PdV=0$. В этом случае $\delta Q=dU$, т.е. передаваемое газу тепло идет только на изменение его внутренней энергии. Теплоемкость газа при постоянном объеме:

$$C_v = \frac{\delta Q}{dT} = \frac{dU}{dT}$$

или

$$C_v = \frac{m}{\mu}\frac{i}{2}R$$

Теперь найдем теплоемкость при постоянном давлении (изобарный процесс):

$$C_p = \frac{\delta Q}{dT} = \frac{dU}{dT} + P\frac{dV}{dT} = C_V + P\frac{dV}{dT}$$

(при этом учли, что $dU/dT=C_V$). Следует, что $C_P>C_V$. Это объясняется тем, что при нагревании при $P=const$ сообщенное газу тепло идет не только на увеличение его внутренней энергии, но и на совершение работы.

Для **одного моля**идеального газа уравнение Менделеева – Клапейрона имеет вид $PV=RT$ и поскольку $PdV=RdT$. Учитывая это, получим *уравнение Майера*, выражающее связь между молярными теплоемкостями при постоянном давлении и постоянном объеме:

$$C_{мp} = C_{mv} + R$$

Можно записать в виде

$$C_{\text{мр}} = \frac{i+2}{2}R$$

При рассмотрении термодинамических процессов важно знать характерное для каждого газа отношение C_P к C_V:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_V} = \frac{i+2}{i}$$

Величина γ называется *коэффициентом Пуассона*, i– число степеней свободы молекул.

2.11 Второе начало термодинамики. Цикл Карно

Второе начало термодинамики — физический принцип, накладывающий ограничение на направление процессов передачи тепла между телами. Второе начало термодинамики гласит, что невозможен самопроизвольный переход тепла от тела, менее нагретого, к телу, более нагретому. Второе начало термодинамики запрещает так называемые вечные двигатели второго рода, показывая, что коэффициент полезного действия не может равняться единице, поскольку для кругового процесса температура холодильника не должна равняться 0. Второе начало термодинамики является постулатом, не доказываемым в рамках термодинамики. Оно было создано на основе обобщения опытных фактов и получило многочисленные экспериментальные подтверждения. Существуют несколько эквивалентных формулировок второго начала термодинамики:

Постулат Клаузиуса: «Невозможен процесс, единственным результатом которого являлась бы передача тепла от более холодного тела к более горячему» (такой процесс называется процессом Клаузиуса).

Постулат Томсона (Кельвина): «Невозможен круговой процесс, единственным результатом которого было бы производство работы за счет охлаждения теплового резервуара» (такой процесс называется процессом Томсона).

Эквивалентность этих формулировок легко показать. В самом деле, допустим, что постулат Клаузиуса неверен, то есть существует процесс, единственным результатом которого была бы передача тепла от более холодного тела к более горячему. Тогда возьмем два тела с различной температурой (нагреватель и холодильник) и проведем несколько циклов тепловой машины, забрав тепло Q_1 у нагревателя, отдав Q2 холодильнику и совершив при этом работу $A = Q_1 - Q_2$. После этого воспользуемся процессом Клаузиуса и вернем тепло Q_2 от холодильника нагревателю. В результате получается, что мы совершили работу только за счет отъёма теплоты от нагревателя, то есть постулат Томсона тоже неверен. С другой стороны, предположим, что неверен постулат Томсона. Тогда можно отнять часть тепла у более холодного тела и превратить в механическую работу. Эту работу можно превратить в тепло, например, с помощью трения, нагрев более горячее тело. Значит, из неверности постулата Томсона следует неверность постулата Клаузиуса. Таким образом, постулаты Клаузиуса и Томсона эквивалентны.

Другая формулировка второго начала термодинамики основывается на понятии энтропии:

«Энтропия изолированной системы не может уменьшаться» (закон не убывания энтропии).

Такая формулировка основывается на представлении об энтропии как о функции состояния системы, что также должно быть постулировано.

В состоянии с максимальной энтропией макроскопические необратимые процессы (а процесс передачи тепла всегда является необратимым из-за постулата Клаузиуса) невозможны.

Цикл Карно́ — идеальный термодинамический цикл. Тепловая машина Карно, работающая по этому циклу, обладает максимальным КПД из всех машин, у которых максимальная и минимальная температуры осуществляемого цикла совпадают соответственно с максимальной и минимальной температурами цикла Карно. Состоит из 2 адиабатических и 2 изотермических процессов.

Одним из важных свойств цикла Карно является его обратимость: он может быть проведён как в прямом, так и в обратном направлении, при этом энтропия адиабатически изолированной (без теплообмена с окружающей средой) системы не меняется.

Пусть тепловая машина состоит из нагревателя с температурой ТН, холодильника с температурой ТХ и рабочего тела.

Цикл Карно состоит из четырёх стадий:

Изотермическое расширение. В начале процесса рабочее тело имеет температуру ТН, то есть температуру нагревателя. Затем тело приводится в контакт с нагревателем, который изотермически (при постоянной температуре) передаёт ему количество теплоты QН. При этом объём рабочего тела увеличивается.

Адиабатическое (изоэнтропическое) расширение. Рабочее тело отсоединяется от нагревателя и продолжает расширяться без теплообмена с окружающей средой. При этом его температура уменьшается до температуры холодильника.

Изотермическое сжатие. Рабочее тело, имеющее к тому времени температуру TX, приводится в контакт с холодильником и начинает изотермически сжиматься, отдавая холодильнику количество теплоты QX.

А диабатическое (изоэнтропическое) сжатие. Рабочее тело отсоединяется от холодильника и сжимается без теплообмена с окружающей средой. При этом его температура увеличивается до температуры нагревателя.

При изотермических процессах температура остаётся постоянной, при адиабатических отсутствует теплообмен, а значит, сохраняется энтропия (поскольку при δQ = 0).

Поэтому цикл Карно удобно представить в координатах T и S (температура и энтропия).

Отсюда коэффициент полезного действия тепловой машины Карно равен:

$$\eta = \frac{Q_H - Q_X}{Q_H} = \frac{T_H - T_X}{T_H}$$

3. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО МЕХАНИКЕ И МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКЕ

3.1 Порядок выполнения лабораторных работ

На первом занятии дается список работ, которые надо выполнить в семестре. Преподаватель назначает каждому студенту конкретную работу, которую надо подготовить к следующему занятию.

Подготовка к работе состоит в следующем.

1. Ознакомиться по руководству с теоретическими основами, методикой и ходом работы.

2. Подготовить отчет: записать номер работы, её название, цель работы, приборы и принадлежности, а также начертить таблицы, записать рабочие формулы.

Студент допускается к работе лишь после того, как ответит на вопросы преподавателя и предъявит подготовленный отчет. Данные опыта заносятся в таблицы непосредственно в ходе работы. В случае ошибки неправильные цифры надо аккуратно зачеркнуть и рядом написать правильные.

Данные измерений предъявляются преподавателю.

После получения подписи студент приводит в порядок рабочее место, возвращает полученные принадлежности и получает задание на следующее занятие.

Данные без подписи преподавателя недействительны. Обработку данных измерений (необходимые расчеты, вычисление погрешностей, построение графиков) выполняют, как правило, дома и предоставляют работу в готовом виде к защите на следующем занятии. Разрешается иметь не более двух незащищенных работ. Работа считается выполненной, если студент сделает все необходимые вычисления, графики и ответит на вопросы преподавателя.

3.2Обработка результатов измерений

3.2.1 Результаты измерений и их ошибки

Физика – наука в основном экспериментальная. Это значит, что физические законы устанавливаются и проверяются путем накопления и сопоставления экспериментальных данных, Для студентов цель выполнения лабораторных работ заключается в том, чтобы изучить приборы, научиться правильно, пользоваться ими, экспериментально изучить физические явления, научиться правильно, измерять числовые значения физических величин и правильно анализировать числовые результаты, полученные путем подстановки в формулы, выражающие физические законы. Эта, простая на первый взгляд, задача на практике оказывается далеко не простой. Измерить какую - либо величину значит узнать, сколько раз заключается в ней однородная величина, принятая за единицу измерения. Очень редко цель работы заключается только в непосредственном измерении физических величин (прямое измерение). В большинстве случаев цель работы заключается в получении результата косвенного измерения, т.е. измерения, связанного с измеряемыми величинами определенной функциональной зависимостью. Измерить физическую величину абсолютно точно невозможно, т. к. всякое измерение сопровождается той или иной ошибкой или погрешностью, т.е. отклонением результата, полученного на опыте, от истинного значения измеряемой величины. Все погрешности, получаемые при измерениях, подразделяют на систематические, случайные и промахи. Систематическими называются погрешности, которые изменяют результат измерения в одну определенную сторону (уменьшая или увеличивая результат) и на определенную величину. Такие погрешности появляются, если в процессе измерений не учтены причины, односторонне влияющие на результат измерений. Например, при взвешивании на чувствительных весах не принята во внимание потеря веса тела в воздухе; при измерении сопротивления пренебрегли сопротивлением вспомогательных проводников.

Источником систематических погрешностей могут быть инструментальные (приборные) ошибки аппаратуры. Например, нуль шкалы термометра может быть смещен, если шкала плохо закреплена с капилляром и т.п. Знак приборной погрешности обычно не известен, а максимальная величина ее задается либо в паспорте к прибору, либо указанием класса точности прибора, либо на самом приборе, на его шкале. Если погрешность прибора не указана, то в качестве ее берется половина цены наименьшего деления шкалы. При этом следует иметь в виду, что это лишь грубая оценка систематической ошибки.

Случайные погрешности обусловлены причинами, искажающими результаты измерений не в определенную сторону, а беспорядочно, от случая к случаю, как в сторону завышения, так и в сторону занижения. Они появляются из-за непостоянства измеряемой величины в процессе измерений, несовершенства измеряющих устройств, наших органов чувств. Например, искажена форма кольца, небольшие колебания температуры. Изучением влияния случайных погрешностей на результаты измерений занимается теория ошибок, которая является разделом теории вероятностей и математической статистики. Результаты этой теории позволяют учесть влияние случайных погрешностей и получить при достаточно большом числе измерений значения измеряемых величин, достаточно близкие к их истинным значениям.

Промахи – это большие по величине погрешности, сильно искажающие результат измерения. Они могут являться следствием неправильной записи, неверного отсчета и т.п.

Например, вместо отсчета на шкале «13» экспериментатор записал «18». Измеряя длину детали линейкой, с краем не было совмещено нулевое деление шкалы.

В лабораторных работах результаты, сильно отличающиеся от остальных, отбрасываются как не внушающие доверия.

3.2.2 Оценка случайных погрешностей при небольшом числе измерений

Измерить физическую величину абсолютно точно невозможно, т.к. всякое измерение сопровождается той или иной ошибкой.

Измерение физической величины может быть выполнено однократно или повторено несколько раз. Если известно, что при измерении физической величины данным методом систематическая погрешность больше случайной, повторять измерения и усреднять их результаты бесполезно. Достаточно выполнить измерения один раз (измерение диаметра правильного цилиндра).

Если главную роль играет погрешность случайная, целесообразно повторить измерение несколько раз.

Оценка случайных погрешностей прямых измерений. При повторных измерениях одной и той же величины получаем отличные друг от друга результаты измерения. Это бывает в тех случаях, когда на результат измерения влияют не поддающиеся учету случайные причины. Естественно, что результаты измерения, $x_1, x_2, x_3, ..., x_n$ полученные при таких условиях, носят тоже случайный характер.

В связи с этим возникает вопрос, что следует считать результатом измерения, наиболее свободным от влияния случайных причин. Как показывает теория ошибок, *среднее арифметическое* из отдельных результатов

1) $$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + ... + x_n}{n}$$

при достаточно большом числе измерений n наиболее близко подходит к истинному значению величины.

Отклонения Δx_i, где $i = 1, 2......n$ каждого отдельного измерения от этого среднего, т. е.

величины:

2)
$$\begin{aligned} \pm\Delta x_1 &= x_1 - \overline{x} \\ \pm\Delta x_2 &= x_2 - \overline{x} \\ \pm\Delta x_3 &= x_3 - \overline{x} \\ &\ldots\ldots\ldots\ldots \\ \pm\Delta x_n &= x_n - \overline{x} \end{aligned}$$

носят название *абсолютных ошибок* отдельных измерений. В данном случае интересует не знак этих ошибок, а лишь их численное значение.

Весь ряд случайных абсолютных ошибок $\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3, \ldots, \Delta x_n$ принято характеризовать средней *абсолютной ошибкой среднего арифметического*

3)
$$\Delta\overline{x} = \frac{|\Delta x_1| + |\Delta x_2| + |\Delta x_3| + \ldots + |\Delta x_n|}{n}$$

При вычислении $\Delta\overline{x}$ абсолютные ошибки отдельных измерений берут по модулю, т.к. находят максимальную погрешность.

Наряду со средней абсолютной ошибкой определяется *средняя относительная погрешность* результата

4)
$$\varepsilon = \frac{\Delta\overline{x}}{\overline{x}} \cdot 100\%$$

5) Результат измерения вместе с погрешностью записывается в виде:

$x = \left(\overline{x} \pm \Delta\overline{x}\right)$, един. измерения величины – *доверительный интервал*

Это означает, что истинное значение x лежит в указанных пределах

$$\overline{x} - \Delta\overline{x} \le x \le \overline{x} + \Delta\overline{x}$$

3.2.3 Правила округления

Запись числовых значений, полученных в результате измерений, отличается от стандартной записи чисел, принятой в арифметике. При десятичной записи результата важно следить за тем, какие цифры соответствуют реально измеренным в эксперименте, а какие возникли исключительно в результате математических операций и находятся за пределами точности опыта. Все цифры, начиная с первой ненулевой, называют *значащими*. Для корректной записи результата необходимо следить, чтобы количество значащих цифр было согласовано с погрешностью измерения. Перечислим правила, которыми необходимо руководствоваться при записи результатов:·последняя цифра записи результата измерения должна соответствовать тому же разряду, что и последняя цифра в погрешности:

неправильно:1,245±0,05 52±0,36 1,24±0,012

правильно: 1,25±0,05 5,2±0,4 1,240±0,012·

величина погрешности имеет характер сугубо статистической оценки и практически не может быть определена с точностью лучше 20%. Поэтому погрешность нужно округлять до одной–двух значащих цифр. Как правило, если последняя цифра в погрешности единица или двойка, то в погрешности оставляют две значащие цифры, в остальных случаях — одну:

неправильно:5,27±0,86 1,236±0,137 1±0,239

правильно:5,3±0,9 *1,24±0,14* 1,0±0,2

Величину ±0,14 не следует округлять до ±0,1, так как при этом значение изменяется на 40%.

Лабораторная работа 1–2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЖЕСТКОСТИ ПРУЖИНЫ

Цель работы: 1. Изучение явления деформации, закона Гука.

2. Определение коэффициента жесткости пружины двумя методами:

а) путем исследования деформации растяжения пружины;

б) путем исследования её колебательных движений.

3. Вычисление работы деформирующей силы и потенциальной энергии пружины.

Приборы и принадлежности: штатив с миллиметровой шкалой, исследуемая пружина, набор грузов по 50 г каждый, секундомер.

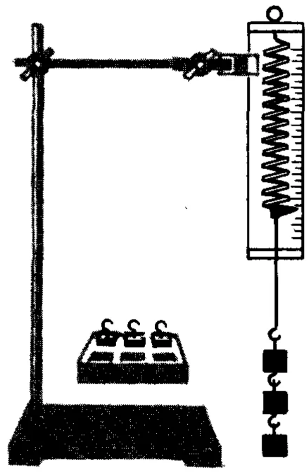


Рисунок 1 – Установка для определения жёсткости пружины

Теоретические сведения

Деформация (от лат. deformatio — «искажение») — изменение взаимного положения частиц тела, связанное с их перемещением друг относительно друга. Проще говоря, это физическое изменение формы, размеров и объема твердых тел под действием внешних сил, при изменении температуры, влажности, фазовых превращениях и других воздействиях.

Деформации разделяют на *обратимые* (упругие) и *необратимые* (неупругие, пластические, ползучести). Деформация называется упругой, если она исчезает после удаления вызвавшей её нагрузки (то есть тело возвращается к первоначальным размерам и форме), и пластической, если после снятия нагрузки деформация не исчезает (или исчезает не полностью). Все реальные твёрдые тела при деформации в большей или меньшей мере обладают пластическими свойствами. При некоторых условиях пластическими свойствами тел можно пренебречь, как это и делается в теории упругости.

Твёрдое тело с достаточной точностью можно считать упругим, то есть не обнаруживающим заметных пластических деформаций, пока нагрузка не превысит некоторого предела (предел упругости).

Кроме этого выделяют следующие виды деформации: растяжение (сжатие), изгиб, сдвиг, кручение. В конечном счёте, любую деформацию можно свести к двум наиболее простым: растяжению (или сжатию) и сдвигу.

Силы упругости – это силы, возникающие в теле при его упругой деформации и направленные в сторону, противоположную смещению частиц при деформации. Они препятствуют деформациям и направлены перпендикулярно поверхности соприкосновения взаимодействующих тел.

$$F_{упр} = -k\Delta x \qquad (1)$$

k - коэффициент жесткости пружины, Н/м; Δx - удлинение, м

Соотношение (1) определяет экспериментально установленный *закон Гука*. Знак минус указывает на то, что силы упругости и удлинения Δx противоположны. Сила упругости в СИ, как и любая другая сила, измеряется в Ньютонах, Н.

Коэффициент жесткости k (коэффициент пропорциональности) численно равен силе, которую следует приложить к пружине для того, чтобы ее длина изменилась на единицу. Коэффициент жесткости пружины показывает, насколько устойчиво тело к действию внешней нагрузки. Зависит этот параметр от геометрических параметров (диаметра проволоки, числа витков и диаметра намотки от оси проволоки) и от материала, из которого она изготовлена.

Описание прибора, вывод расчетной формулы и порядок выполнения работы

Часть 1. Определение коэффициента жесткости пружины путем её растяжения.

Подвесьте к пружине груз и измерьте удлинение пружины. Полученные данные внесите в таблицу №1. Далее к первому грузу добавьте второй, третий и т.д. грузы, записывая каждый раз удлинение пружины. По результатам измерений заполните таблицу №1.

Таблица №1

Масса груза m (кг)				……
Удлинение пружины Δx, (м)				
Сила тяжести F, (Н)				

По данным таблицы №1 построить график зависимости растяжения пружины от величины действующей силы, т.е.

$$\Delta x = f(F)$$

Из графика определить одно значение k, зная, что

$$k = \left| \frac{F}{\Delta x} \right| \tag{2}$$

Часть 2. Определение коэффициента жесткости пружины путем исследования её колебательных движений.

Движение материальной точки под действием упругой силы совершается по закону гармонических колебаний

$$F_{упр} = -m\omega^2 x, \tag{3}$$

где $F_{упр}$ – упругая сила; m – масса материальной точки; ω – циклическая (круговая) частота.

Прировняем уравнения 1 и 2 и найдем циклическую частоту

$$-kx = -m\omega^2 x \Rightarrow \omega = \sqrt{\frac{k}{x}} \tag{4}$$

Известно, что

$$\omega = 2\pi\nu, \tag{5}$$

где ν – частота колебаний

Прировняв уравнения 3 и 4, найдем k

$$k = 4\pi^2\nu^2 m \tag{6}$$

Частота колебаний может быть найдена из опыта, если подсчитать число колебаний пружины N за определенный промежуток времени t.

$$\nu = \frac{N}{t} \tag{7}$$

Для этого, нагрузите пружину грузами массой m, а затем оттяните ее несколько ниже положения равновесия. Определите при помощи секундомера время 10-50 колебаний пружины. Повторите эксперимент несколько раз.

Запишите полученные значения в таблицу №2 и вычислите k, используя формулу 6.

Таблица №2

№	m (кг)	N	t (с)	ν (с$^{-1}$)	k (кг/с^2)	$\bar{k}$ (кг/с^2)	Δk (кг/с^2)	$\Delta\bar{k}$ (кг/с^2)	ε (%)
1									
2									
…									

Рассчитайте абсолютную и относительную погрешности для жесткости пружины k. Запишите результат: $k = \left(\bar{k} \pm \Delta\bar{k}\right)$, ед. измерения.

Часть 3. Вычисление работы деформирующей силы и потенциальной энергии пружины.

Потенциальная энергия упругой пружины равна работе, совершенной над пружиной.

При равновесии деформирующая сила уравновешивается силой упругости

$$F_{деф} = -F_{упр} = kx \tag{8}$$

Тогда работа деформирующей силы будет определяться соотношением

$$dA = Fdx = -kxdx \tag{9}$$

Проинтегрируем выражение

$$A = \int dA = -\int_{x_1}^{x_2} kxdx = \frac{kx_1^2}{2} - \frac{kx_2^2}{2} = \frac{k\Delta x^2}{2} \tag{10}$$

Единица измерения работы в СИ – Джоуль, Дж.

Зная коэффициент жёсткости пружины k и её удлинение Δx, вычислите потенциальную энергию пружины:

$$A = E_{пот} = \frac{k\Delta x^2}{2} \tag{11}$$

Единица измерения потенциальной энергии в СИ – Джоуль, Дж.

Значения k и Δx необходимо взять из части 1.

Результаты расчетов занесите в таблицу №3

Таблица №3

Δx (м)						
$E_{пот}$ (Дж)						

Построить график зависимости потенциальной энергии пружины от величины деформации

$$E_{пот} = f(\Delta x)$$

Контрольные вопросы

1. Что называется деформацией?
2. Какую деформацию называют упругой и неупругой, приведите примеры?
3. Виды деформации
4. Дайте понятие силе упругости
5. Какая зависимость выражается законом Гука?
6. Физический смысл коэффициента жёсткости пружины? Единица измерения
7. Какие методы определения жесткости пружины вы использовали
8. Как определяется работа деформирующей силы и потенциальная энергия пружины

Лабораторная работа 1–4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ МАХОВИКА

Цель работы: 1. Изучить основной закон динамики вращательного движения твердого тела

2. Определить момент инерции маховика, состоящего из диска, шкива и вала.

Приборы и принадлежности: маховик, штангенциркуль, набор грузов, вертикальная линейка, секундомер

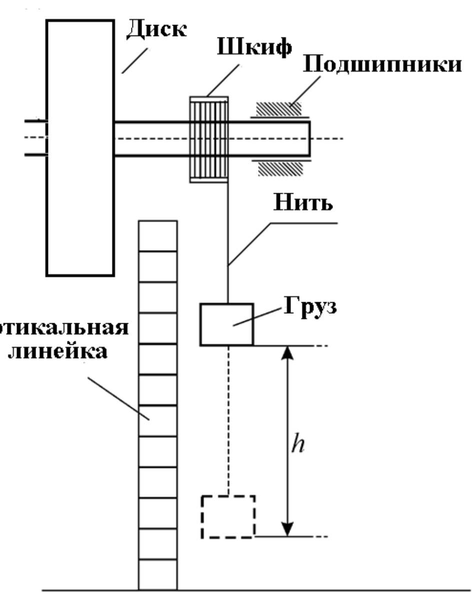


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки для определения момента инерции маховика

Теоретические сведения

Маховик (маховое колесо) это массивное вращающееся колесо, использующееся в качестве накопителя (инерционный аккумулятор) кинетической энергии. Применяется маховик в ветряных турбинах, наряду с двигателем с приводом от генератора для хранения энергии, в автомобильных двигателях, в электромобилях для ускорения (на экспериментальной стадии), в электрических сетях для защиты от перебоев.

Вращающееся тело обладает инертностью, т.е. свойством сохранять состояние равномерного прямолинейного движения или покоя, когда действующие на него силы отсутствуют или взаимно уравновешены. Чем инертнее тело, тем труднее изменить скорость его вращения. Инертность тела определяется не только его массой, но и тем как масса распределена относительно оси вращения.

Мерой инертности тела, вращающегося вокруг оси, является его *момент инерции* относительно этой же оси. Таким образом, момент инерции тела характеризует распределение его массы относительно оси вращения.

Моментом инерции материальной точки J_i относительно оси вращения называется произведение массы этой точки на квадрат расстояния от оси.

$$J_i = m_i r_i^2 \tag{1}$$

Моментом инерции системы (тела) материальных точек относительно оси вращения называется физическая величина, равная сумме произведений масс n материальных точек системы на квадраты их расстояний до рассматриваемой оси.

$$J = \sum_{i=1}^{n} J_i = \sum_{i=1}^{n} m_i r_i^2 \tag{2}$$

Единица измерения в СИ кг□м^2.

Для характеристики вращательного действия силы $\vec{F}$ вводят понятие *момент силы (вращательный момент)* $\vec{M}$ это векторная физическая величина, равная векторному произведению вектора силы и радиус-вектора $\vec{r}$, проведённого от оси вращения к точке приложения этой силы (рис. 2).

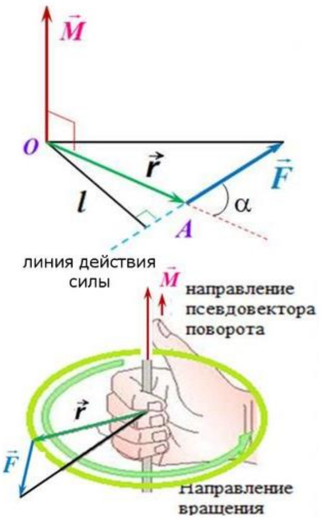


Рисунок 2 – Момент силы

$$\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F} \tag{3}$$

Модуль момента силы $M = rF\sin\alpha$, где $r\sin\alpha = l$ – *плечо силы.*

Плечо силы – кратчайшее расстояние от оси вращения до линии действия силы.

Направление момента силы (рис.2) совпадает с осью вращения и определяется по правилу правого винта (правило буравчика, правило правой руки).

Единица измерения момента сил в системе СИ – Н□м.

Основной закон динамики вращения (II закон Ньютона для вращательного движения):

$$\vec{M} = J \cdot \vec{\varepsilon} \qquad (4)$$

Основной закон динамики вращательного движения: момент вращающей силы, приложенной к телу, равен произведению момента инерции тела на угловое ускорение.

Если при вращении тела момент инерции изменяется, то применяется более общая форма основного закона вращения тела – *закон изменения момента количества движения* (характеризует количество вращательного движения):

$$\vec{M} = J \cdot \vec{\varepsilon} = J \cdot \frac{d\vec{\omega}}{dt} \Rightarrow \vec{M} \cdot dt = J \cdot d\vec{\omega} \qquad (5)$$

Величина $\vec{M} \cdot dt$ – называется импульсом момента внешних сил, а величина $\vec{L} = J \cdot \vec{\omega}$ – моментом импульса тела, или интеграл движения.

Согласно равенству (5) изменение момента количества движения твердого тела численно равно импульсу момента приложенных к нему сил.

При отсутствии момента сил $\vec{M} = 0$ момент количества движения остается постоянным. Это следствие носит название *закона сохранения момента количества движения.*

Описание прибора, вывод расчетной формулы и порядок выполнения работы

Описание прибора и вывод расчетной формулы. На рисунке 1 показана схема экспериментальной установки. Маховик (массивный диск) плотно сидит на валу. Вал может вращаться в подшипниках с малым трением около горизонтальной оси. Ось вращения проходит через центр тяжести маховика. На валу маховика плотно насажен шкив, снабженный болтиком, на который надевается петля нити и нить наматывается в несколько оборотов на шкив. На свободный конец нити помещен груз, массой m, приводящий всю систему в равноускоренное движение.

Под действием груза на маховик будет действовать вращающий момент M, равный произведению силы F_H (рис. 3), приложенной к нити (натяжение нити) на плечо, т.е.

$$M = F_H \cdot \frac{d}{2}\ , \qquad (6)$$

где d – диаметр шкива, а $\frac{d}{2}$ – плечо силы.

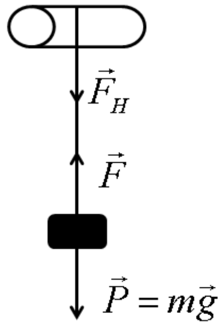


Рисунок 3 – Действия сил при вращении маховика

Если тело действует на нить с силой, то и нить действует на тело с силой F, которая приложена к телу (рис. 3). В соответствии с третьим законом Ньютона эти силы равны по величине, но противоположны по направлению

$$F_H = -F \tag{7}$$

Для определения силы F рассмотрим движение тела вниз. На тело действуют две силы – сила тяжести $P = mg$ и сила F со стороны нити. Под действием этих сил груз будет совершать движение с ускорением a, которое определяем из уравнения:

$$P - F = ma \Rightarrow mg - F = ma \Rightarrow F = m(g-a) \tag{8}$$

g – ускорение силы тяжести на Земле = 9,8 м/с^2.

Вращающий момент M определяется уравнением

$$M = \frac{d}{2} m(g-a) \tag{9}$$

Момент инерции маховика равен:

$$J = \frac{M}{\varepsilon} = \frac{d}{2\varepsilon} m(g-a), \tag{10}$$

где ε – угловое ускорение маховика и шкива, a – линейное ускорение.

Угловое ускорение шкива и линейное ускорение связаны следующим соотношением:

$$\varepsilon = \frac{a}{r} = \frac{2a}{d}, \tag{11}$$

где r – радиус шкива.

Измеряя, секундомером время опускания груза с высоты h, найдем величину линейного ускорения:

$$a = \frac{2h}{t^2} \tag{12}$$

С учетом формул 10 и 12 получим формулу для определения момента инерции маховика:

$$J = \frac{d^2t^2m}{8h}\left(g - \frac{2h}{t^2}\right) \tag{13}$$

Порядок выполнения работы

1. Штангенциркулем измерьте диаметр шкива d и запишите его значение.

2. Нить закрепите за болтик шкива. На нить поочередно подвесьте грузы разными массами (100 г, 200 г, либо 300 г). Поднимите первый груз массой m на высоту h, близкую к максимальной. Измерьте масштабной линейкой с точностью высоту h (от нижнего торца груза до пола) и запишите её значение.

3. Определите время t опускания груза с высоты h. Для этого одновременно опускаете маховик и включаете секундомер. В момент удара груза о пол секундомер выключаете. Записываете результаты измерений в таблицу №1 и повторяете опыт пять раз для груза одной и той же массы.

4. Повторяете опыт со следующим грузом.

Таблица №1

Масса m_1 = ... *(кг)*						Масса m_2 = ... *(кг)*					Масса m_3 = ... *(кг)*				
№	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
t, с															
	$t_{1ср}$ …. *(с)*					$t_{2ср}$ …. *(с)*					$t_{3ср}$ …. *(с)*				

5. По формуле (13) рассчитайте момент инерции маховика, используя результаты измерений для каждого из грузов.

6. Для одного из измерений, например, первого, определите абсолютную и относительную погрешности измерения момента инерции

Для определения абсолютной погрешности используйте формулу:

$$\Delta J_1 = J_1\left(2\frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta h}{h} + 2\frac{\Delta t}{t}\right),$$

где $\Delta d, \Delta m, \Delta h, \Delta t$ – точность соответствующих измерений

Для определения относительной погрешности используйте формулу:

$$\varepsilon = \frac{\Delta J_1}{J_1} = \left(2\frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta h}{h} + 2\frac{\Delta t}{t}\right)$$

Результат представьте в виде: $J = \left(J_1 \pm \Delta J_1\right)$, ед. измерения.

Контрольные вопросы

1. Где применяется маховик?
2. Что называют моментом инерции точки?

3. Что называют моментом инерции тела?
4. Как определяется момент силы относительно произвольной оси?
5. Что такое плечо силы?
6. Как определяется направление момента силы?
7. Каково основное уравнение динамики вращательного движения твердого тела?
8. Как формулируется закон изменения момент количества движения?

Лабораторная работа 1 – 13

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ МАХОВИКА МЕТОДОМ КОЛЕБАНИЙ

Цель работы: 1. Ознакомиться с вращаемым движением и его характеристиками.

2. Определить момент инерции маховика и проверить теорему Штейнера.

Приборы и принадлежности: маховик; набор грузов (шарик, цилиндр, куб); секундомер; штангенциркуль; линейка.

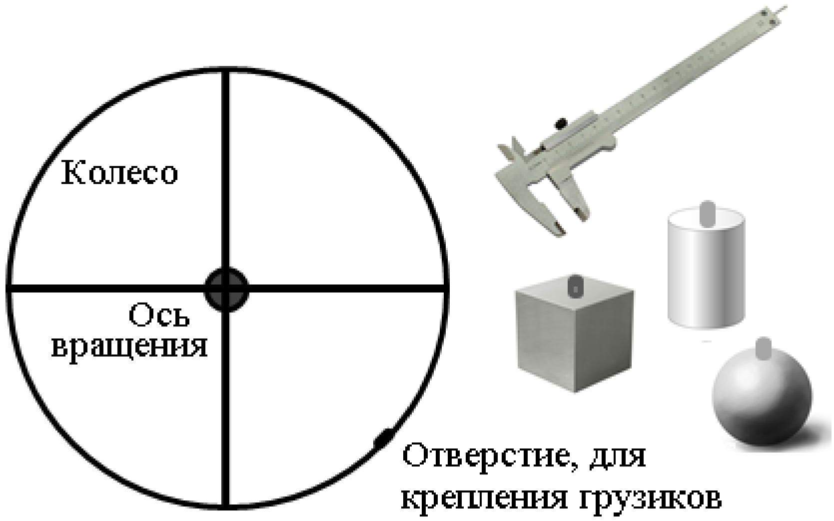


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки для определения момента инерции маховика методом колебаний.

Теоретические сведения

Маховик – это твердое тело, центр тяжести которого лежит на оси вращения. Такое тело будет находиться в состоянии безразличного равновесия и будет покоиться во всяком положении, в котором желательно его установить. Если к маховику, имеющему горизонтальную ось вращения, прикрепить добавочный груз, центр тяжести которого не лежит на оси вращения маховика, то центр тяжести вновь образованной системы сместится с оси вращения в направлении прикрепленного груза и равновесие будет уже устойчивым. Такой маховик, будучи выведенным, из положения устойчивого равновесия, будет колебаться относительно оси вращения, представляя собой физический маятник.

В механике твердое тело можно рассматривать как совокупность материальных точек с наложенными н них жесткими связями. Произвольное движение твердого тела можно представить как сложное, состоящее из поступательного и вращательного движений. Момент инерции является мерой инертности твердого тела при вращательном движении и определяет способность тела изменять угловую скорость под действием вращающего момента внешних сил. Момент инерции является аддитивной величиной и зависит от материала, формы и размера тела, а так же от распределения массы тела относительно оси вращения.

Моментом инерции материальной точки J_i относительно оси вращения называется произведение массы этой точки на квадрат расстояния от оси.

$$J_i = m_i r_i^2 \qquad (1)$$

Моментом инерции системы (тела) материальных точек относительно оси вращения называется физическая величина, равная сумме произведений масс n материальных точек системы на квадраты их расстояний до рассматриваемой оси.

$$J = \sum_{i=1}^{n} J_i = \sum_{i=1}^{n} m_i r_i^2 \qquad (2)$$

Единица измерения в СИ кг/м^2.

В случае непрерывного распределения масс эта сумма сводится к интегралу

$$J = \int r^2 dm, \qquad (3)$$

где dm – элементарная масса, r – ее расстояние до оси вращения.

Выразив элементарную массу через плотность ρ и её объем dV, получим

$$J = \int r^2 \rho dV \qquad (4)$$

Момент инерции тела правильной формы (цилиндр, шар, куб и т.д.) можно рассчитать.

В качестве примера найдем момент инерции однородного сплошного цилиндра (тонкого диска) высотой h и радиусом R относительно оси, перпендикулярной плоскости диска и проходящей через центр (рис. 2).

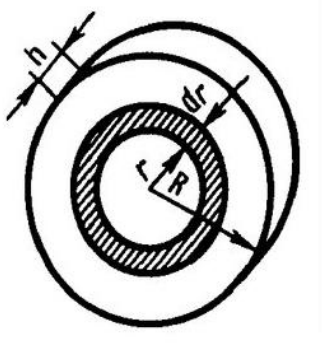


Рисунок 2 – однородный сплошной цилиндр (тонкий диск)

Разобьём диск на кольцевые слои бесконечно малой толщины dr. Все точки одного слоя будут находиться на одинаковом расстоянии до оси, равным r. Объем такого слоя равен

$$dV = 2\pi rh \cdot dr \qquad (5)$$

По формуле (4) имеем

$$J = \rho\int_0^R r^2 2\pi rh \cdot dr = 2\pi h\rho\int_0^R r^3 dr = \frac{1}{2}\pi hR^4\rho \tag{6}$$

Так как объем диска равен $V = \pi R^4 h$, то его масса $m = \pi R^4 h\rho$, следовательно, момент инерции диска будет

$$J = \frac{1}{2}mR^2 \tag{7}$$

Нахождение момента инерции в рассмотренном примере значительно упростилось вследствие того, что момент инерции был найден относительно оси симметрии. Вычисление момента инерции относительно любой другой оси (не проходящей через центр масс) оказалось бы более сложным.

Если известен момент инерции тела относительно оси, проходящей через его центр масс, то момент инерции относительно любой другой параллельной оси определяется *теоремой Штейнера*: момент инерции тела J относительно произвольной оси равен моменту его инерции J_c относительно параллельной оси, проходящей через центр масс тела, сложенному с произведением массы тела m на квадрат расстояния a между осями (рис. 3):

$$J = J_c + ma^2 \tag{8}$$

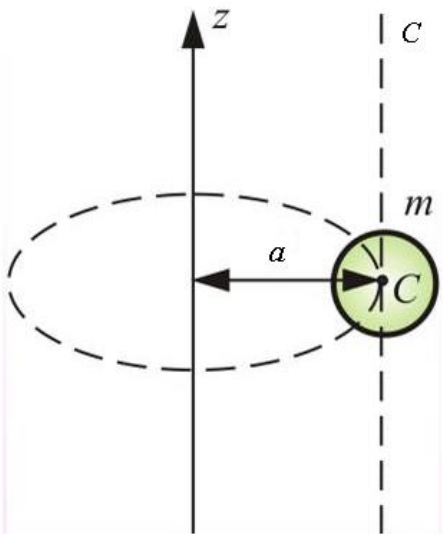


Рисунок 3 – Теорема Штейнера

В заключение несколько примеров значения моментов инерции для некоторых тел:

1) Полый тонкостенный цилиндр $J = mR^2$

2) Прямой тонкий стержень длиной l $J = \frac{1}{12} ml^2$

3) Шар $J = \frac{2}{5} mR^2$

Описание прибора, вывод расчетной формулы и порядок выполнения работы

Описание прибора и вывод рабочей формулы. Прибор, применяемый в данной лабораторной работе, представляет собой маховик, который состоит из колеса, которое может вращаться с малым трением вокруг горизонтальной оси *O* (рис. 4).

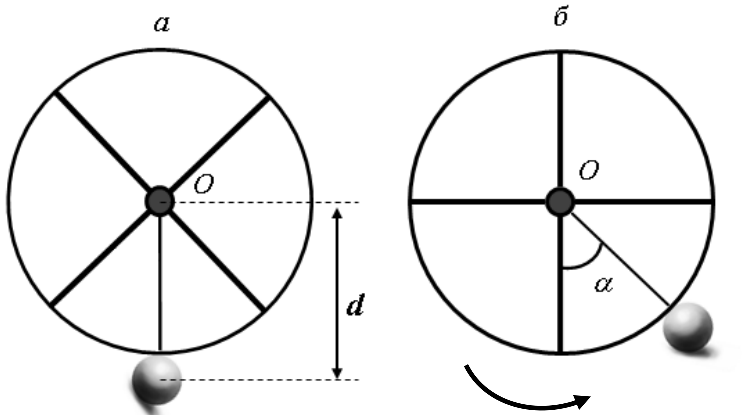


Рисунок 4 – Маховик, представляющий собой колесо, которое вращается вокруг горизонтальной оси *O*

Система находится в состоянии безразличного равновесия. Если к колесу прикрепить шарик (цилиндр или куб), то безразличное равновесие системы заменяется устойчивым. Поэтому колесо, выведенное из положения равновесия (рис. 4б), начинает совершать колебания с некоторым периодом *T*. Значение момента инерции колеса находим, пользуясь законом сохранения механической энергии

$$E_К + E_П = const\,, \tag{9}$$

где $E_К$ – кинетическая энергия системы, а $E_П$ – потенциальная энергия системы.

Пусть колебания колеса будут гармоническими

$$\varphi = \alpha \sin \omega t\,, \tag{10}$$

где $\omega = \frac{2\pi}{T}$

Угловое смещение в момент времени t определяется $\varphi = \alpha \sin \frac{2\pi}{T} t$, где $\frac{2\pi}{T} t$ – фаза колебания, α – угловая амплитуда колебаний, $\varphi = 0$ – начальная фаза колебания.

Дифференцируя это выражение по t, находим угловую скорость

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt} = \frac{2\pi}{T} \alpha \cos \frac{2\pi}{T} t \qquad (11)$$

При прохождении телом положения равновесия фаза колебаний становится равной нулю и косинус в последнем выражении принимает значение, равное единице. Таким образом, угловая скорость колеса при прохождении положения равновесия будет равной

$$\omega = \frac{2\pi\alpha}{T} \qquad (12)$$

Учитывая, что кинетическая энергия вращающегося твердого тела равна:

$$E_K = \frac{J\omega^2}{2} \qquad (13)$$

Тогда максимальная кинетическая энергия вращающегося твердого тела равна:

$$E_K = \frac{1}{2}\left(J + J'\right)\left(\frac{2\pi\alpha}{T}\right)^2, \qquad (14)$$

где J и J' – моменты инерции колеса и вспомогательного тела соответственно, относительно оси вращения.

Потенциальная энергия системы при небольшом её отклонении от положения равновесия равна $E_П = mgh$, где m – масса тела, h – высота его поднятия по отношению к начальному положению, которая будет определятся

$$h = d - d\cos\alpha = d\left(1 - \cos\alpha\right) = 2d\sin^2\frac{\alpha}{2} \qquad (15)$$

где d – расстояние центра тяжести тела от оси вращения.

Для небольших амплитуд можно положить $\sin\frac{\alpha}{2} \approx \frac{\alpha}{2}$

Тогда $h = \frac{d\alpha^2}{2}$. Поэтому потенциальная энергия системы в крайнем положении равна

$$E_П = mg\frac{\alpha^2}{2}d \qquad (16)$$

Если пренебречь силами трения и сопротивления воздуха, то из равенств

(14) и (16) на основании закона сохранения механической энергии получим:

$$\frac{1}{2}\left(J+J'\right)\left(\frac{2\pi\alpha}{T}\right)^2 = mg\,\frac{\alpha^2}{2}d \qquad (17)$$

отсюда выразим момент инерции маховика

$$J=\frac{mgdT^2}{4\pi^2}-J' \qquad (18)$$

Все величины в первом члене правой части этого выражения доступны непосредственному измерению. Значение вспомогательного тела относительно оси вращения системы находим на основании теоремы Штейнера.

Для шарика $$J'=\frac{2}{5}mr^2+md^2, \qquad (19)$$

где r – радиус шарика

Для цилиндра $$J'=\frac{1}{2}mR^2+md^2, \qquad (20)$$

где R – радиус цилиндра

Для куба $$J'=\frac{1}{12}ml^2+md^2, \qquad (21)$$

где l – сторона куба (длина стержня)

Порядок выполнения работы

1. Запишите массу шарика, цилиндра и куба в таблицу №1.
2. Измерьте штангенциркулем размеры вспомогательных тел и запишите данные в таблицу №1. r – радиус шарика, R – радиус цилиндра, l – сторона (высота) куба.
3. Закрепите тело на колесе, в котором имеется отверстие, и измерьте расстояние d от оси вращения до центра тяжести соответствующего тела.
4. По формулам (19), (20) и (21) определите момент инерции J' каждого тела.
5. Поочередно проводите опыт с шариком, цилиндром, кубом
6. Отклонив маховик с телом от положения равновесия на угол, не превышающий 8 – 10^0, определите время t 15 – 20 полных колебаний, данные запишите в таблицу №2
7. Найдите период колебаний $T=\dfrac{t}{n}$ для каждого тела
8. По формуле (18) определите момент инерции маховика J
9. Определите абсолютную и относительную погрешность для J
10. Запишите окончательный результат в виде $J=\left(\bar{J}\pm\Delta\bar{J}\right)$, ед. изм.

Таблица №1

Название вспомогательного тела	m (кг)	r (м)	R (м)	l (м)	d (м)	J' (кг□м^2)
Шар			–	–		
Цилиндр		–		–		
Куб		–	–			

Таблица №2

Название тела	n	t (с)	T (с)	J (кг□м^2)	$\bar{J}$ (кг□м^2)	ΔJ (кг□м^2)	$\Delta\bar{J}$ (кг□м^2)	ε (%)
Шар								
Цилиндр								
Куб								

Контрольные вопросы

1. Что такое момент инерции? Поясните его физический смысл
2. От чего зависит момент инерции тела?
3. Единица измерения момента инерции
4. Выведите момент инерции для однородного диска относительно оси, перпендикулярной его плоскости и проходящей через его центр
5. Сформулируйте теорему Штейнера
6. Как определяется момент инерции для некоторых тел: полый тонкостенный цилиндр, прямой тонкий стержень, шар

Лабораторная работа 1 – 6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЛОГАРИФМИЧЕСКОГО ДЕКРЕМЕНТА ЗАТУХАНИЯ ПРИ КОЛЕБАНИЯХ МАЯТНИКА

Цель работы: изучение колебательных процессов, затухающих колебаний, определение логарифмического декремента затухания

Приборы и принадлежности: маятник, секундомер.

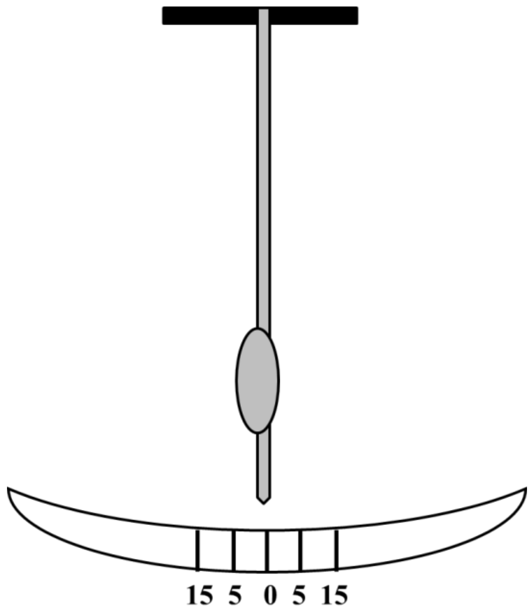


Рисунок 1 – Схема установки для изучения колебаний маятника

Теоретические сведения

Колебаниями называются движения или процессы, которые обладают определенной повторяемостью. Например, при колебаниях маятника повторяются отклонения его в ту и другую сторону от вертикального положения, при колебаниях в электрическом колебательном контуре повторяются величины и направление тока, текущего через катушку. Существует несколько видов колебаний: свободные, вынужденные, гармонические и затухающие. По физической природе выделяют следующие виды колебательных движений: механические, тепловые, электромагнитные, смешанные.

Колебания называются *свободными* (или собственными), если они совершаются за счет первоначально сообщенной энергии, без дальнейшего внешнего воздействия на колебательную систему. *Колебания* называются *вынужденными*, если они происходят под действием периодически изменяющейся внешней силы.

Гармоническими называются *колебания*, при которых колеблющаяся физическая величина изменяется по закону косинуса (или синуса).

Гармоническое колебание величины *x* описывается уравнением типа:

$$x = A\cos(\omega t + \varphi), \qquad (1)$$

где A – амплитуда колебания – максимальное значение колеблющейся величины, ω – круговая (циклическая) частота, φ – начальная фаза колебаний в момент времени $t = 0$, $\omega t + \varphi$ – фаза колебаний в момент времени t.

Периодом колебаний T называется наименьший промежуток времени по истечении которого повторяются состояния колеблющейся системы (совершается одно полное колебание).

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \qquad (2)$$

При колебаниях маятника его амплитуда постепенно, с течением времени убывает, и колебания затухают. Таким, образом, *затухающие колебания* — это колебания, амплитуда которых уменьшается с течением времени под действием внешних сил (рис.2).

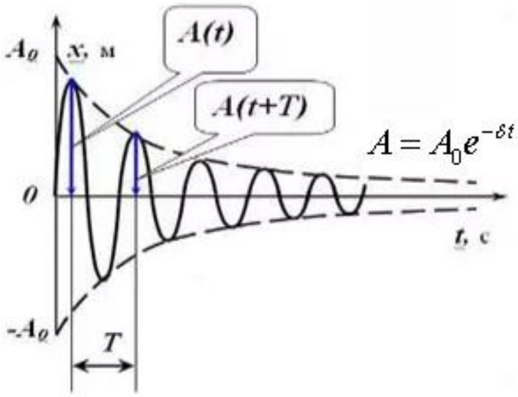


Рисунок 2 – Затухающие колебания

Затухание происходит из-за сопротивлений, препятствующих движению маятника. Основным сопротивлением является трение в точках подвеса маятника, а также трение о воздух. Часть энергии колеблющегося маятника расходуется на работу по преодолению сил сопротивления, поэтому смещение его от положения равновесия с течением времени уменьшается по закону:

$$x = A_0e^{-\delta t}\cos(\omega t + \varphi) \qquad (3)$$

где x – смещение от положения равновесия в момент времени t; A_0 -начальная амплитуда колебаний; e – основание натурального логарифма; δ – коэффициент затухания.

Выражение

$$A = A_0e^{-\delta t} \qquad (4)$$

представляет собой амплитуду затухающего колебания в произвольный момент времени t. Зависимость (3) показана на рисунке 1 сплошной линией, а зависимость (4) штриховыми линиями. Промежуток времени $\tau = 1/\delta$, в течение которого амплитуда затухающих колебаний уменьшается в e раз, называется *временем релаксации*.

Затухание нарушает периодичность колебаний, поэтому затухающие колебания не являются периодическими, и понятие периода или частоты не приемлемо. Однако, если затухание мало, то можно условно пользоваться понятием периода как промежутка времени между двумя последующими максимумами (минимумами) колеблющейся величины (рис.2).

Найдем отношение амплитуд двух последующих колебаний. Иначе говоря, найдем отношение их значений в момент времени t_1 и $t_1 + T$, где T - период колебаний:

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{A_0 e^{-\delta t_1}}{A_0 e^{-\delta(t_1+T)}} = e^{\delta T} \qquad (5)$$

или в общем виде отношение n - й амплитуды к $(n+1)$-й:

$$\frac{A_n}{A_{n+1}} = e^{\delta T} \qquad (6)$$

Если A_n и A_{n+1} – амплитуды двух последовательных колебаний, соответствующих моментам времени t, отличающихся на период T, то соотношение (6) называется *декрементом затухания*, а его логарифм

$$\Theta = \ln \frac{A_n}{A_{n+1}} = \ln e^{\delta T} = \delta T \qquad (7)$$

логарифмическим декрементом затухания.

Выясним физический смысл величин δ и Θ. Коэффициент затухания есть физическая величина, обратная времени релаксации, в течение которого амплитуда убывает в e раз, т. е. $\delta = 1/\tau$. Логарифмические декремент затухания характеризует убывание амплитуды колебаний за один период.

Пусть N - число колебаний, после которых амплитуда уменьшается в e раз. Тогда $\tau = NT$

$$\Theta = \delta T = \frac{T}{\tau} = \frac{1}{N} \qquad (8)$$

Логарифмический декремент затухания Θ есть физическая величина, обратная числу колебаний N, по истечении которых амплитуда убывает в e раз.

Описание прибора, вывод расчетной формулы и порядок выполнения работы

Описание прибора. Для определения декремента затухания в работе применен маятник на двух подвесах длиной в 1,5-2 м (рис. 1). Бифилярный подвес использован для того, чтобы получить колебания маятника в одной плоскости. Для увеличения затухания маятника на нем имеется диск, закрепленный так, что его плоскость перпендикулярна плоскости качания маятника.

Время измеряется с помощью секундомера.

Измерения амплитуд колебаний маятника ведут по шкале, расположенной внизу маятника.

Порядок выполнения работы.

Часть 1. Определение периода колебания маятника.

Период колебания маятника при малом коэффициенте затухания практически не зависит от амплитуды. Чтобы убедиться в этом, отклоните маятник от положения равновесия на 10–25 см. После 2–5 колебаний в момент прохождения указателя маятника через положение равновесия включите секундомер и, начиная от нуля, начинайте вести счет полных колебаний. Так определяют время 10–20 полных колебаний маятника.

Измерив, время и количество полных колебаний, найдите период колебаний по формуле:

$$T_1 = \frac{t_1}{N},$$

где t_1 – время (с), N – число полных колебаний.

Когда амплитуда колебаний достигнет 5 – 10 см, снова повторяют определение периода колебаний, т.е. находя время t_2 при N полных колебаниях (столько же полных колебаний), как и в первом случае, и определяют период.

Опыт необходимо повторить 3 – 5 раз. Данные занести в таблицу №1

Таблица №1

№	Число полных колебаний N	Время t (с)	Период T (с)	$T_{ср}$ (с)
1				
2				
…				

Часть 2. Определение логарифмического декремента затухания Θ и коэффициента затухания δ.

Чтобы определить логарифмический декремент затухания, необходимо найти амплитуды колебаний. Амплитуды колебаний определяют только по одну сторону от положения равновесия (допустим, справа). Для этого отклоните маятник на 30 – 40 см и начините последовательно определять по шкале значения амплитуд (достаточно 20 – 30 амплитуд). Запишите полученные значения: A_0 = … (см), A_1 = … (см), A_2 =…(см), A_3 = ...(см) и т.д.

Постройте график зависимости амплитуды от времени (периоды колебаний) $A = f(t)$.

Рассчитайте логарифмический декремент затухания. Достаточно пяти значений логарифмического декремента затухания:

$$\Theta_1 = \ln \frac{A_0}{A_1}$$

$$\Theta_2 = \ln \frac{A_1}{A_2}$$

....

$$\Theta_5 = \ln \frac{A_4}{A_5}$$

Здесь $\ln$ – натуральный логарифм.

Полученные значения занесите в таблицу №2 и рассчитайте погрешность.

Таблица №2

№	Логарифмический декремент затухания Θ	$\bar{\Theta}$	$\Delta\Theta$	$\Delta\bar{\Theta}$	$\varepsilon(\%)$
1					
2					
…					

Запишите результат: $\Theta = (\bar{\Theta} \pm \Delta\bar{\Theta})$

Определите коэффициент затухания δ :

$$\delta = \frac{\Theta_{ср}}{T_{ср}}$$

Запишите аналитический закон изменения амплитуды

$$A_n = A_0 e^{-\delta t}$$

Контрольные вопросы

1. Что такое колебания?
2. Перечислите виды колебаний
3. Какие колебания называют гармоническими
4. Напишите уравнение гармонических колебаний
5. Как определяется период колебаний
6. Какие колебания называются затухающими? Уравнение затухающих колебаний
7. Что называется логарифмическим декрементом затухания
8. Каков физический смысл коэффициента затухания

Лабораторная работа 1 – 9

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ УДЕЛЬНОЙ ТЕПОЛЕМКОСТИ ВОЗДУХА ПРИ ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ C_P К УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОЕМКОСТИ ПРИ ПОСТОЯННОМ ОБЪЕМЕ C_V МЕТОДОМ АДИАБАТИЧЕСКОГО РАСШИРЕНИЯ

Цель работы: 1. Изучить первое начало термодинамики

2. Изучить адиабатический процесс в газе

3. Определить отношение удельной теплоемкости газа при постоянном давлении к удельной теплоемкости при постоянном объеме $\gamma = \dfrac{C_P}{C_V}$ методом адиабатического расширения (методом Клемана – Дезорма).

Приборы и принадлежности: стеклянный баллон, водяной манометр, ручной насос.

Рисунок 1 – экспериментальная установка Клемана-Дезорма. 1 – насос, 2 – баллон с воздухом, 3 – манометра

Теоретические сведения

Тепловое движение молекул газа характеризуется средней кинетической энергией. Температура газа определяется значением этой энергии и, следовательно, изменение температуры свидетельствует об изменении кинетической энергии молекул. Молекулы реального газа взаимодействуют между собой, поэтому реальный газ обладает кинетической энергией и потенциальной энергией взаимодействия. Сумма кинетической энергии и потенциальной энергии молекул составляет внутреннюю энергию газа U (Дж). *Внутренняя энергия* U – это энергия хаотического (теплового) движения микрочастиц системы (молекул, атомов, электронов, ядер ит. д.) и энергия взаимодействия этих частиц.

Состояние идеального газа определяется величиной его объема V (м[2]), давления P (Па), температуры T (К) и массы m (кг). Соотношение, связывающее эти параметры, называют уравнением состояния газа. Уравнением состояния идеального газа является уравнение Менделеева-Клапейрона:

$$PV = \frac{m}{\mu} RT \quad , \tag{1}$$

где константа R = 8,31 Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная, μ – молярная масса (масса одного моля вещества).

Изменение состояния газа (системы) связано с изменением его энергии. Существует два различных способа изменения внутренней энергии системы: с изменением внешних параметров (работа) и без изменения этих параметров (теплота). При первом из этих способов (с изменением внешних параметров) изменение внутренней энергии системы происходит за счёт перемещения внешних тел, воздействующих на систему, или изменением действующих на систему внешних полей и называется работой A (Дж). При втором способе изменения внутренней энергии системы (без изменения внешних параметров) не происходит перемещений внешних тел или изменений действующих на систему внешних полей, т. е. не совершается макроскопическая работа, а внутренняя энергия изменяется. Это возможно, если рассматриваемая система приводится в тепловой контакт с другими телами, имеющими температуру, отличную от температуры самой системы – теплообмен. Обмен энергией между телами осуществляется теплопроводностью, либо излучением.

Количество энергии, передаваемое одним телом другому в процессе теплообмена, называется *количеством теплоты* Q (Дж).

Закон сохранения и превращения энергии в применении к тепловым процессам называют *первым началом термодинамики*.

Первое начало термодинамики: теплота, сообщаемая системе, расходуется на изменение её внутренней энергии и на совершение ею работы против внешних сил.

$$Q = \Delta U + A \tag{2}$$

Выражение (2) называют аналитическим выражением первого закона термодинамики. Это соотношение устанавливает, что в данном термодинамическом процессе теплота расходуется в двух направлениях: на изменение внутренней энергии и на совершение внешней работы.

Другая формулировка первого начала термодинамики связана с тем, что если система периодически возвращается в первоначальное состояние, и следовательно $\Delta U = 0$, то $A = Q$, т. е. *вечный двигатель первого рода* – периодически действующий двигатель, который совершал бы бóльшую работу, чем сообщенная ему извне энергия, – невозможен.

Для характеристики тепловых свойств вещества вводится понятие теплоемкостей: полной, удельной, молярной.

Удельная теплоемкость вещества c – величина, равная количеству теплоты, необходимому для нагревания 1кг вещества на 1К:

$$c = \frac{dQ}{mdT} \tag{3}$$

Молярная теплоемкость вещества C_μ – величина, равная количеству теплоты, необходимому для нагревания 1моль вещества на 1К:

$$C_\mu = \frac{dQ}{\nu dT} \tag{4}$$

Единица удельной и молярной теплоемкости соответственно Дж/(кг□К), Дж/(моль□К).

Теплоемкость моля вещества C_μ и удельная теплоемкость c связаны соотношением: $C_\mu = c\mu$

Различают теплоемкости при постоянном объёме и постоянном давлении, если в процессе нагревания вещества его объём или давление поддерживается постоянным.

Из первого начала термодинамики $\delta Q = dU + \delta A$, с учётом $\delta A = pdV$ и $c_\mu = \dfrac{dQ}{\nu dT}$, для 1 моль газа получим

$$C_\mu dT = dU_\mu + pdV_\mu \tag{5}$$

При $V = const$ работа внешних сил равна нулю $\delta A = 0$ и сообщаемая газу извне теплота идет только на увеличение его внутренней энергии

$$C_V = \frac{dU_\mu}{dT} \tag{6}$$

C_V равна изменению внутренней энергии 1 моль газа при повышении его температуры на 1 К.

Численные значения удельных теплоемкостей моля газа зависят от состава молекул. Эту зависимость можно показать, выразив теплоемкости через число степеней свободы молекул i.

Числом степеней свободы i называется наименьшее число независимых координат, которое нужно задать для того, чтобы определить положение молекулы в пространстве. Для одноатомных газов i = 3, для двухатомных i = 5, для молекул трех и более атомных газов i = 6. Сухой воздух на 99 % состоит из двухатомных молекул (молярный состав: 21.0% кислорода, 78.1% азота, 0.9% – остальные газы). Таким образом, для большинства молекул воздуха при комнатной температуре число степеней свободы равно 5.

Поскольку $dU_\mu = 1/2RdT$, то

$$C_V = \frac{i}{2}R \qquad (7)$$

При $p = const$, то

$$C_p = \frac{dU_\mu}{dT} + \frac{pdV_\mu}{dT} \qquad (8)$$

$\frac{dU_\mu}{dT}$ C_p не зависит от вида процесса и всегда равна C_V

Дифференцируя уравнение Менделеева-Клайперона $pV_\mu = RT$ по T при $p = const$, получим

$$C_p = C_V + R \text{ - Уравнение Майера} \qquad (9)$$

$$C_p = \frac{i}{2}R + R = \frac{i+2}{2}R \qquad (10)$$

Из уравнения Майера видно, что $C_p > C_V$. Объясняется это тем, что в изохорном процессе все тепло переходит во внутреннюю энергию газа, а в изобарном - часть тепла идет на совершение работы, из-за этого газ нагревается меньше и нужно большее количество теплоты, чтобы нагреть его на 1 градус.

Измерение C_p и особенно C_V газа опытным путем произвести трудно, т.к. теплоемкость данной массы газа составляет ничтожную долю теплоемкости сосуда, в который газ заключен. Измерение отношения теплоемкостей данного газа $\gamma = \frac{C_p}{C_V}$ произвести проще.

Отношение $\frac{C_p}{C_V}$ всегда больше единицы:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_V} = \frac{i+2}{2} > 1 \qquad (11)$$

Коэффициент γ входит в целый ряд уравнений термодинамики. Он зависит от числа степеней свободы молекул, из которых состоит газ. Этот коэффициент называют – *коэффициентом Пуассона.*

Отношение $\frac{C_p}{C_V}$ можно определить, проводя над газом адиабатический процесс.

Адиабатическим процессом называют процесс, при котором отсутствует теплообмен между системой и окружающей средой ($\delta Q = 0$). Это очень быстрый процесс, чтобы не происходил обмен энергий с окружающей средой, например образование туманов, облаков. Для протекания такого процесса необходимо, чтобы газ был окружен совершенно нетеплопроводными стенками, т.е. помещен в теплонепроницаемую (адиабатическую) оболочку. Таких стенок не существует и практически процесс можно считать адиабатическим, если сжатие или расширение газа протекает так быстро, что теплообмен с внешней средой не успевает произойти. Адиабатический процесс в технике используют в огнетушителях, дизельных двигателях, в циклах двигателей внутреннего сгорания, холодильных установках и т.д.

Первый закон термодинамики применительно к адиабатическому процессу, запишется так:

$$dU + dA = 0 \qquad (12)$$

Из (6) и (12) следует, что

$$dA = -C_V m dT \ ,$$

т.е. работа адиабатического расширения совершается за счет убыли внутренней энергии газа. Следовательно, если газ расширяется адиабатически, то его температура падает, если сжимается, - то происходит нагревание газа.

Давление данной массы газа согласно уравнению (1) зависит от объема и температуры

$$p = \frac{{}^{m}\!/_{\mu} RT}{V} \qquad (13)$$

Если температура газа во время процесса остается постоянной $T = const$ (изотермический процесс), то давление изменяется обратно пропорционально его объему. Изотермический процесс в газе описывается законом Бойля-Мариотта:

$$PV = const \qquad (14)$$

Уравнение адиабатического процесса, связывающее давление газа с его объемом – *уравнение Пуассона*, имеет вид:

$$PV^{\gamma} = const \qquad (15)$$

γ *– коэффициент адиабаты,* коэффициент Пуассона

Внешние силы, сжимая газ адиабатически, совершают работу и при этом температура газа увеличивается. В результате давление в газе растет быстрее, чем при изотермическом процессе. Диаграмма адиабатического процесса – адиабата в координатах (*p,V*) изображается гиперболой (рис.2) Адиабата ($\delta Q = 0$) изображается более крутой кривой по сравнению с изотермой $T = const$. Это объясняется тем, что при адиабатическом сжатии 1-3 увеличение давления газа обусловлено не только уменьшением его объема, но и повышением температуры.

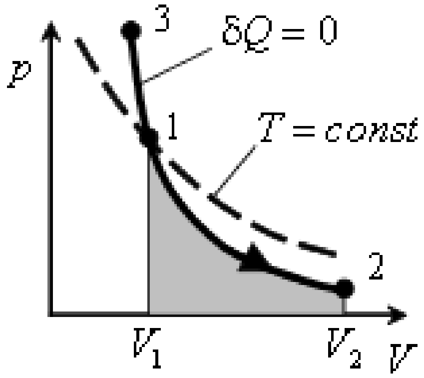


Рисунок 2 – Диаграмма адиабатического процесса

Описание прибора, вывод расчетной формулы и порядок выполнения работы

Для определения $\gamma = \frac{C_p}{C_V}$ применяется метод адиабатического расширения (метод Клемана – Дезорма).

Описание прибора. Лабораторная установка содержит стеклянный баллон **Б**, в пробке которого имеются три отверстия: **К1** - постоянно соединенное с манометром **М, К2** - соединенное с насосом **Н, К3** - соединяется с окружающим воздухом (рис. 3).

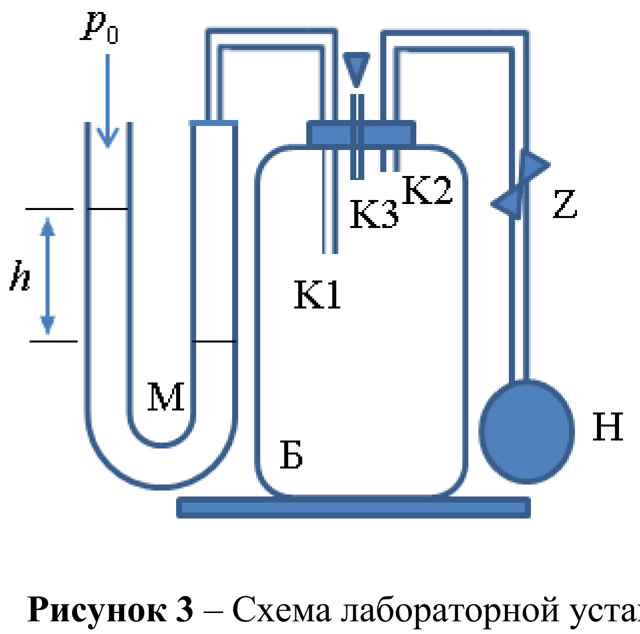


Рисунок 3 – Схема лабораторной установки

Расчетные формулы. В начале опыта открываем отверстие К3, жидкость в обоих коленах манометра устанавливается на одинаковом уровне. Это начальное состояние газа характеризуется следующими величинами: объемом V_0, давлением p_0, равным атмосферному, температурой T_0 (комнатной). Затем отверстие **К3** плотно закрываем пробкой, при помощи насоса **Н** накачиваем воздух в баллон **Б** до получения разности уровней манометра 25–30 см. После чего зажим **Z** зажимаем.

При накачивании масса воздуха, занимающая первоначально баллон **Б**, сжимается до некоторого меньшего объема V_1. Так как накачивание происходит за малый промежуток времени, то сжатие газа адиабатно (без теплообмена с окружающей средой) и температура газа немного повышается. Нужно подождать, пока в баллоне воздух примет комнатную температуру, а это выразится тем, что разность уровней манометра перестанет уменьшаться. Теперь состояние газа в баллоне характеризуется величинами V_1, p_1, T_0, где $p = p_0 + h$. Назовем это состояние первым.

Затем быстрым движением открываем отверстие **К3** и, как только разность уровней манометра сделается равной нулю, плотно его закроем. При этом газ адиабатно расширяется до некоторого объема V_2, давление падает до атмосферного давления p_0, температура понижается ниже комнатной $T_1 < T_0$.

Расширяясь без доступа тепла, воздух производит работу за счет своей внутренней энергии. Этим и объясняется понижение температуры.

Второе состояние воздуха в баллоне характеризуется следующими величинами: V_2, p_0, T_1.

Немедленно после того, как закрываем отверстие **К3**, начинает вновь возникать разность уровней манометра. Это показывает на возрастание давления внутри баллона, вызванного нагреванием воздуха в баллоне до комнатной температуры. Ожидаем, пока разность уровней установится. Обозначим ее h_1.

В третьем состоянии газ имеет объем V_2, давление p_2, температуру T_0.

Первое состояние - V_1, p_1, T_0

Второе состояние - V_2, p_0, T_1

Третье состояние - V_2, p_2, T_0

Переход из первого состояния во второе является адиабатным процессом, поэтому здесь можно воспользоваться уравнением Пуассона:

$$p_1 V^{\gamma}{}_1 = p_0 V_2^{\gamma} \tag{16}$$

Откуда:

$$\frac{P_1}{P_0} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma} \tag{17}$$

Переход из первого состояния в третье может быть осуществлен изотермически, т.к. температура газа в этих состояниях одинаковая. К такому переходу можно применить закон Бойля–Мариотта: $p_1 V_1 = p_2 V_2$

Откуда:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{V_2}{V_1} \tag{18}$$

Подставим выражение (18) в (17), получим

$$\frac{P_1}{P_0} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\gamma} \tag{19}$$

Логарифмируя это выражение, имеем: $\lg p_1 - \lg p_0 = (\lg p_1 - \lg p_2)\gamma$ или

$$\gamma = \frac{\lg p_1 - \lg p_0}{\lg p_1 - \lg p_2} \tag{20}$$

Если p_0, p_1, p_2 мало отличаются друг от друга, то разность логарифмов прямо пропорциональна разности чисел, т.к. h и h_1 малы по сравнению с p_0.

В данной работе это условие выполняется, т.к. h и h_1 малы по сравнению с p_0. Следовательно, можно написать:

$$\gamma = \frac{p_1 - p_0}{p_1 - p_2} \tag{21}$$

Так как $p_1 = p_0 + h$ $p_2 = p_0 + h_1$, то

$$\gamma = \frac{h}{h - h_1} \tag{22}$$

Порядок выполнения работы

1. Открываем отверстие **К3**.
2. Плотно закрываем отверстие **К3** и при помощи груши накачиваем воздух в баллон.
3. Зажимаем зажим **Z** и выжидаем, пока разность уровней в манометре установится. Записываем полученное значение h в таблицу.
4. Открываем отверстие **К3** и как только сравняются уровни жидкости в манометре, вновь плотно его закрываем.
5. Выжидаем, пока установится постоянная разность уровней в манометре и ее значение h_1 записываем в таблицу.
6. По формуле (22) вычисляем величину γ.

Опыт необходимо провести не менее пяти раз. Вычислите среднее значение γ, а также среднюю абсолютную и среднюю относительную погрешности. Измерения запишите в таблицу №1.

Таблица №1

№	h (см)	h_1 (см)	γ	$\overline{\gamma}$	$\Delta\gamma$	$\Delta\overline{\gamma}$	ε (%)
1							
2							
3							
…							

Запишите результат в виде: $\gamma = \left(\overline{\gamma} \pm \Delta\overline{\gamma}\right)$

Сравните среднее значение γ, полученное опытным путем со значением, полученным при теоретическом расчете по формуле $\gamma = \dfrac{i+2}{i}$ (считать, что воздух состоит из двухатомных молекул)

Контрольные вопросы

1. Дайте определение внутренней энергии
2. Назовите способы изменения внутренней энергии системы
3. Уравнение состояния газа
4. Дайте понятие удельной и молярной теплоемкости
5. Единица измерения теплоемкости
6. Как формулируется первое начало термодинамики?
7. Каким уравнением оно выражается?
8. Что такое число степеней свободы?
9. Чему равна теплоемкость газа при изотермическом процессе? При изобарическом процессе?
10. Уравнение Майера
11. Почему теплоемкость газа при изобарическом процессе больше теплоемкости этого же газа при изохорическом процессе?
12. Какой процесс называется адиабатическим?
13. Каким уравнением описывается адиабатический процесс?
14. Почему адиабата идет круче изотермы?
15. В чем заключается сущность метод Клемана – Дезорма? Для чего его используют?

Лабораторная работа 1-10

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ВОЗДУХА, РАСЧЕТ СРЕДНЕЙ ДЛИНЫ СВОБОДНОГО ПРОБЕГА И ЭФФЕКТИВНОГО ДИАМЕТРА МОЛЕКУЛ ВОЗДУХА

Цель работы: экспериментально определить коэффициент вязкости воздуха и рассчитать среднюю длину свободного пробега и эффективный диаметр молекулы воздуха.

Приборы и принадлежности: сосуд с водой, емкость и стеклянный мерный стаканчик, секундомер

Теоретические сведения

Основное положение молекулярно-кинетической теории сводится к тому, что во всяком теле хаотически движутся молекулы, скорости, движения которых определяют тепловое состояние тела. Известно, что при температурах порядка комнатной среднеквадратичная скорость молекул воздуха близка к 500 м/с. Если это так, то возникает вопрос, почему запахи в воздухе распространяются сравнительно медленно. Это объясняется тем, что вследствие столкновений друг с другом молекулы перемещаются не все время прямолинейно: весь их путь является зигзагообразным, состоящим из отдельный прямолинейных отрезков пути (между соударениями). Изменение направления движения на заметный угол под действием другой молекулы называется столкновением молекул. Именно с таким понятием столкновения связана величина, которая характеризует размеры молекул. *Средней длиной свободного пробега* $\langle \lambda \rangle$ молекулы называется среднее расстояние, проходимое между последовательными столкновениями ее с другими молекулами. *Эффективный диаметр молекулы* d – это минимальное расстояние, на которое сближаются при столкновении центры двух молекул. Эффективный диаметр больше истинного и зависит от энергии молекул, а следовательно, и от температуры.

Согласно молекулярно-кинетической теории хаотическое движение молекул является физической причиной наблюдаемых в газах явлений переноса: перенос энергии при выравнивании температур (теплопроводность), перенос массы при выравнивании плотности (диффузия) и перенос импульса (вязкость).

В результате обмена количеством движения между слоями возникают силы внутреннего трения, которые тормозят движение быстрого слоя и ускоряют движение медленного, что приводит к выравниванию скоростей. Это явление называется внутренним трением, или вязкостью газа (жидкости). Сила трения между слоями равна:

$$F = \eta \frac{\Delta \upsilon}{\Delta h} \Delta S\,, \qquad (1)$$

где η – коэффициент пропорциональности, зависящий от рода газа (жидкости), называемый коэффициентом вязкости, или просто вязкостью; $\frac{\Delta \upsilon}{\Delta h}$ – градиент скорости; ΔS – площадь соприкосновения слоев; F – сила трения, направленная по касательной к поверхности соприкосновения слоев ΔS.

Полагая, что $\Delta S = 1$ м^2, $\frac{\Delta \upsilon}{\Delta h} = 1$ с$^{-1}$

получим:

$$F = \eta \qquad (2)$$

т.е. коэффициент вязкости численно равен силе внутреннего трения, действующей на 1 м^2 площади соприкосновения параллельно движущихся слоев газа (жидкости) при градиенте скорости в 1 с$^{-1}$.

Для случая протекания газа /жидкости/ по трубе справедлива формула Пуазейля:

$$V = \frac{\pi r^4 t}{8 l \eta} \Delta P\,, \qquad (3)$$

где r – радиус трубы; l – длина трубы; ΔP – разность давлений на концах трубы; t – время, в течение которого через поперечное сечение трубы проходит объем газа (жидкости), равный V; η – коэффициент вязкости.

Таким образом, газ (жидкость) тем быстрее протекает по трубе, чем меньше коэффициент вязкости и чем больше разность давлений.

Формула (3) справедлива в случае ламинарного течения. *Ламинарное течение* это такое течение, при котором соседние слои газа (жидкости) текут хотя и с разными скоростями, но параллельно друг другу (не перемешиваясь).

Описание прибора, вывод расчетной формулы и порядок выполнения работы

Описание прибора, вывод расчетной формулы. Установка для определения вязкости воздуха состоит из сосуда **1** с краном **2**, шкалой **3**, пробкой **4**, в которую вставлен капилляр **5** (рис. 1). При закрытом кране давление воздуха в сосу де и в помещении одно и тоже. Если открыть кран то вода начнет быстро выливаться и давление в сосуде будет падать.

Вследствие этого скорость истечения воды со временем уменьшается.

Если бы капилляр был закрыт, то через некоторое время вода перестала бы вытекать из сосуда.

Однако через капилляр в сосуд будет поступать воздух из комнаты и тем быстрее, чем больше разность давления ΔP в комнате и в сосуде. В конце

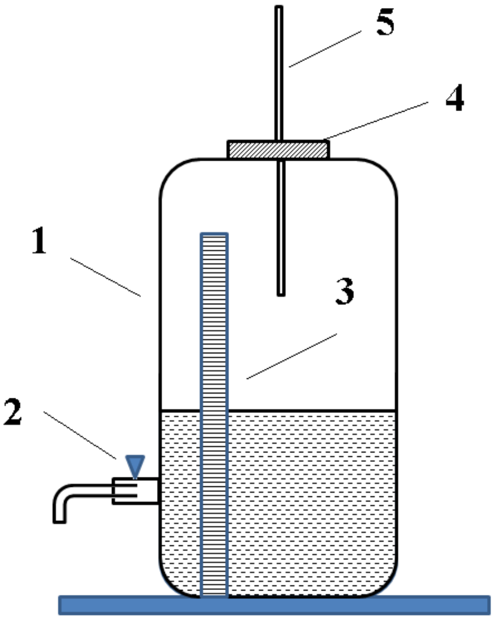


Рисунок 1 – экспериментальная установка для определения вязкости воздуха

концов устанавливается равновесие: какой объем воздуха войдет в сосуд за определенное время, такой же объем воды вытечет из сосуда за это же самое время.

Измерив объем вытекающей воды, мы тем самым узнаем объем воздуха, протекающего через капилляр. Определив соответствующее время секундомером и зная ΔP, а также размеры капилляра, мы по формуле (3) можем подсчитать коэффициент вязкости η воздуха, т.е.

$$\eta = \frac{\pi r^4 t}{8lV} \Delta P, \qquad (4)$$

где r – радиус трубы; l – длина трубы; ΔP – разность давлений на концах трубы; t – время, в течение которого через поперечное сечение трубы проходит объем газа (жидкости), равный V.

Знание вязкости воздуха дает возможность определить среднюю длину свободного пробега и эффективный диаметр молекул воздуха, т.е. величины, характеризующие молекулярную структуру газа.

Из кинетической теории идеального газа известно, что коэффициент вязкости газа:

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \langle \lambda \rangle \langle \upsilon \rangle \qquad (5)$$

где ρ – плотность газа, $\langle\lambda\rangle$ – средняя длина свободного пробега молекул, $\langle\upsilon\rangle$ – средняя арифметическая скорость движения молекул.

Плотность газа определяется следующим выражением, которое вытекает из уравнения Менделеева–Клайперона

$$\rho = \frac{P\mu}{RT} \tag{6}$$

μ – молярная масса газа, P – давление газа, T – абсолютная температура, R – универсальная газовая постоянная.

Средняя арифметическая скорость молекул воздуха находится по формуле:

$$\langle\upsilon\rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}} = 1,6\sqrt{\frac{RT}{\mu}} \tag{7}$$

Подставив уравнение (6) и (7) в уравнение (5), получим для средней длины свободного пробега молекул воздуха следующее выражение:

$$\langle\lambda\rangle = \frac{3\eta}{\rho\langle\upsilon\rangle} = \frac{3\eta RT}{1,6P\mu}\sqrt{\frac{\mu}{RT}} = \frac{1,87\eta}{P}\sqrt{\frac{RT}{\mu}} \tag{8}$$

Для воздуха $\mu = 28,96\cdot10^{-3}\,кг/моль$, $R = 8,31\,Дж/моль\cdot К$

Соотношение

$$\langle\lambda\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 n_0} \tag{9}$$

позволяет найти эффективный диаметр молекул воздуха. Здесь n_0 – число молекул газа при данных условиях в единице объема.

Согласно основному уравнению кинетической теории газов

$$n_0 = \frac{P}{kT} \tag{10}$$

где $k = 1,38\cdot10^{-23}\,Дж/К$ – постоянная Больцмана.

Из (9) и (10) получаем выражение для эффективного диаметра молекул газа

$$d^2 = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi\langle\lambda\rangle P} \Rightarrow d = \sqrt{\frac{kT}{1,4\langle\lambda\rangle\pi P}} \tag{11}$$

Порядок выполнения работы

1. Поставьте под кран какую-нибудь емкость и открыть кран. Дождитесь, пока вода станет выливаться каплями.
2. Подставьте под кран мерный стаканчик и одновременно пустите секундомер.

3. Сразу же после этого замерьте показания высоты воды в сосуде по шкале h_1 и занесите данные в таблицу №1.
4. Дождитесь, пока в стаканчике наберется 50–100 см^3 воды.
5. Закройте кран, одновременно остановив секундомер. Запишите время истечения воды t и новое показание по шкале h_2 и запишите эти значения в таблицу №1
6. Определите $\Delta P = \rho_в g h$, где $h = \dfrac{h_1 + h_2}{2}$ $\rho_в$ – плотность воды.
7. Опыт повторить три 3 – 5 раз.
8. Вычислить коэффициент вязкости воздуха η по формуле (4).
9. Рассчитайте абсолютную и относительную погрешности для η .
10. Результат запишите в виде: $\eta = \left(\overline{\eta} \pm \Delta\eta\right)$, ед. измерения.
11. Используя среднее значение коэффициента вязкости воздуха, рассчитайте по формуле (8) среднюю длину свободного пробега молекул.
12. Вычислите по формуле (11) эффективный диаметр молекул воздуха.

Таблица №1

№	V (м^3)	h_1 (м)	h_2 (м)	h (м)	ΔP (Н/м^2)	t (с)	η (Па□с)	$\overline{\eta}$ (Па□с)	$\Delta\eta$ (Па□с)	$\Delta\overline{\eta}$ (Па□с)	ε %
1											
2											
…											

Контрольные вопросы

1. Что называется коэффициентом вязкости?
2. Записать формулу для силы трения между слоями газа (жидкости).
3. Какова причина возникновения силы внутреннего трения?
4. Какой физический смысл коэффициента вязкости? В каких единицах СИ измеряется эта величина?
5. Назовите явления переноса в газах
6. Что называется эффективным диаметром молекул?
7. Какая величина называется средней длиной свободного пробега молекулы? От каких физических величин она зависит?
8. Какое течение жидкости называется ламинарным?

Лабораторная работа 1-11

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВНУТРЕННЕГО ТРЕНИЯ ЖИДКОСТИ (ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ) МЕТОДОМ СТОКСА

Цель работы: 1. Изучить явление внутреннего трения в жидкости;

2. Определить коэффициенты вязкости жидкости методом Стокса.

Приборы и принадлежности: сосуд с жидкостью, масштабная линейка, шарики, секундомер, микрометр.

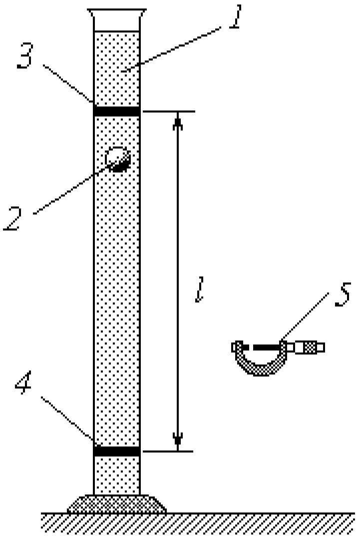


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки. 1 – цилиндрический сосуд с жидкостью, 2 – шарик, 3 – верхняя метка, 4 – нижняя метка, 5 – микрометр

Теоретические сведения

Идеальная жидкость, т.е. жидкость, движущаяся без трения, является абстрактным понятием. Всем реальным жидкостям и газам в большей или меньшей степени присуща вязкость или внутреннее трение. *Вязкость* – важная физико-химическая характеристика веществ. Величина, обратная вязкости, называется текучестью. Её необходимо учитывать, например, при перекачке жидкостей и газов по трубопроводам, разливке расплавленных металлов, смазке машин и механизмов.

Вязкость (внутреннее трение) свойство жидкости оказывать сопротивление относительному сдвигу слоёв. Вязкость проявляется в том, что при относительном перемещении слоёв жидкости медленнее движущийся слой жидкости «тормозит» слой, движущийся быстрее, и наоборот. Вязкость обусловлена наличием между отдельными частицами (молекулами) жидкости сил притяжения, которые при перемещении одной части жидкости относительно другой сдерживают движение слоёв. Очевидно, что все жидкости должны быть вязкими, так как между реальными молекулами всегда существуют силы не только притяжения, но и отталкивания. Равновесие между этими силами и определяет равновесное состояние жидкости. Если один из слоёв жидкости вывести из состояния равновесия и перемещать его с некоторой скоростью относительно другого, то силы притяжения частиц будут тормозить это движение. Во всех реальных жидкостях и газах при перемещении одного слоя относительно другого возникают силы трения. И. Ньютон установил основной механический закон вязкости в 1713 г. – сила трения прямо пропорциональна относительной скорости движения площади контакта слоёв и обратно пропорциональна расстоянию между слоями (между центрами движущихся слоёв). Эта сила, направленная по касательной к слоям, называется силой внутреннего трения.

$$F = \eta \frac{d\upsilon}{dx} S, \tag{1}$$

где η – динамический коэффициент вязкости, $\dfrac{d\upsilon}{dx}$ – градиент скорости течения жидкости, S – площадь соприкосновения слоев жидкости.

Динамический коэффициент вязкости зависит от природы жидкости и температуры. У всех жидкостей с ростом температуры динамическая вязкость уменьшается (у газов – увеличивается). В системе СИ динамический коэффициент вязкости измеряется в Паскаль секундах (Па·с). Паскаль-секунда – это динамическая вязкость среды, при ламинарном течении которой в слоях, находящихся на расстоянии 1 м, в направлении, перпендикулярном течению, под действием давления сдвига 1 Па возникает разность скоростей течения 1 м/с.

Кроме динамической вязкости жидкость характеризуется также *кинематической вязкостью*. Коэффициент кинематической вязкости равен отношению динамического коэффициента вязкости к плотности жидкости:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \tag{2}$$

В системе СИ кинематический коэффициент вязкости измеряется в м^2/с.

Явление внутреннего трения имеет большое практическое значение. Например, смазка трущихся поверхностей в различных механизмах позволяет заменить внешнее (сухое) трение значительно меньшим внутренним трением масла. Вязкость является важной физико-химической характеристикой для оценки качества продуктов, соков, масел, сиропов, других пищевых продуктов, продуктов крови и т.д. Определения вязкости нашло широкое применение при изучении седиментации (оседания) зернистых порошковых пищевых продуктов, крахмала, порошка какао, сахара и т.д. Для определения коэффициентов внутреннего трения жидкостей и газов применяются приборы, называемые вискозиметрами.

Основными методами определения коэффициентов внутреннего трения являются: 1) метод Стокса; 2) метод капиллярных трубок; 3) метод затухающих колебаний, совершаемых диском или шаром, подвешенным на упругой нити в исследуемой среде. В данной работе изучается метод Стокса.

Описание прибора, вывод расчетной формулы и порядок выполнения работы

Описание прибора и вывод расчетной формулы. Прибор для определения коэффициента вязкости методом Стокса состоит из стеклянного цилиндра, установленного вертикально на специальной подставке. В цилиндр налита исследуемая жидкость. Шарики пускают в жидкость как можно ближе к оси цилиндра.

Метод, предложенный английским физиком Стоксом, основывается на исследовании условий движения шарика в вязкой жидкости.

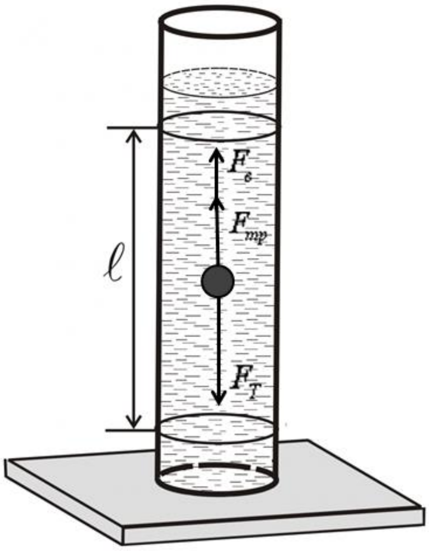


Рисунок 2 – Схема установки. Показано движение шарика под действием трёх сил: силы тяжести, выталкивающей силы и силы трения.

Когда в вязкую жидкость опускают тяжелый шарик, смачиваемый этой жидкостью, то он падает значительно медленнее, чем в воздухе, и его движение может стать равномерным. Это объясняется тем, что слой жидкости, прилегающий к поверхности шарика, как бы прилипает к нему и, увлекаясь за шариком, движется с той же скоростью, что и шарик. Все последующие слои тоже приводят в движение и движутся с меньшими скоростями, тормозя движение шарика.

Трение здесь возникает между слоями жидкости.

Стокс установил, что сила внутреннего трения F, действующая на шарик малого размера, движущийся равномерно, пропорциональна скорости его падения υ, радиусу шарика r и зависит от динамического коэффициента вязкости жидкости η

$$F = 6\pi\eta r\upsilon \qquad (3)$$

Выражение (3) носит название формулы Стокса.

Движущийся в жидкости шарик (рис. 2) находится под действием трех сил: 1) силы тяжести F_T, направленной вертикально вниз; 2) выталкивающей силы (закон Архимеда) $F_в$, направленной вертикально вверх и равной весу вытесненной шариком жидкости; 3) силы внутреннего трения (закон Стокса) $F_{тр}$, направленной вертикально вверх.

$$F_T = \frac{1}{6}\pi d^3 \rho_ш g \,, \tag{4}$$

где d – диаметр шарика, $\rho_ш$ – плотность шарика, g – ускорение свободного падения.

$$F_в = \frac{1}{6}\pi d^3 \rho_ж g \,, \tag{5}$$

где $\rho_ж$ – плотность жидкости.

$$F_{тр} = 6\pi\eta r\upsilon = 6\pi\eta\frac{d}{2}\upsilon = 3\pi\eta d\upsilon \,, \tag{6}$$

где η – динамический коэффициент вязкости; υ - скорость движения шарика.

При падении в вязкую среду шарик, двигаясь ускоренно, приобретает такую скорость, при которой силы, действующие на него, взаимно уравновешиваются. В этом случае имеет равенство:

$$F_T = F_в + F_{тр} \tag{7}$$

$$\frac{1}{6}\pi d^3 \rho_ш g = \frac{1}{6}\pi d^3 \rho_ж g + 3\pi\eta d\upsilon \Rightarrow \tag{8}$$

$$\eta = \frac{1}{18}\frac{\left(\rho_ш - \rho_ж\right)}{\upsilon} g d^2 \tag{9}$$

Так как движение шарика будет равномерным, то

$$\upsilon = \frac{l}{t} \tag{10}$$

где l – расстояние, пройденное шариком; t – время прохождения шариком пути l.

Подставив значение скорости движения шарика (10) в формулу (9), получим расчетную формулу для определения динамического коэффициента вязкости:

$$\eta = \frac{1}{18}\frac{\left(\rho_ш - \rho_ж\right)}{l} g d^2 t \tag{11}$$

Порядок выполнения работы

1. Измерьте расстояние между двумя метками (например, резиновыми кольцами) на цилиндре, предварительно установленными так, чтобы верхняя метка была ниже уровня жидкости на 5-6 см, а нижняя – на 2-3 см выше дна цилиндра.
2. Измерьте диаметры шариков микрометром.
3. Шарик опустить в цилиндр при помощи пинцета как можно ближе к оси цилиндра.
4. Измерьте время прохождения шариком расстояния между верхней и нижней метками.
5. Опыт повторите 3–5 раз с различными шариками.
6. Запишите значения: $\rho_{ш}$ = (кг/м^3); $\rho_{ж}$ = (кг/м^3).
7. Рассчитайте динамический коэффициент вязкости жидкости по формуле (11).
8. Результаты всех измерений занесите в таблицу №1.

Таблица №1

№	l (м)	d (м)	t (с)	η (Па□с)	$\overline{\eta}$ (Па□с)	$\Delta\eta$ (Па□с)	$\Delta\overline{\eta}$ (Па□с)	ε (%)
1								
2								
…								

Запишите результат в виде: $\eta = \left(\overline{\eta} \pm \Delta\overline{\eta}\right)$, ед. измерения

Контрольные вопросы

1. Что называется вязкостью жидкости?
2. Каков механизм внутреннего трения в жидкостях с точки зрения молекулярно-кинетической теории?
3. Каков физический смысл коэффициента внутреннего трения?
4. Что называется коэффициентом кинематической и динамической вязкости? Как динамическая вязкость связана с кинематической?
5. Какова зависимость вязкости жидкости от температуры?
6. Чему равна сила вязкого трения между двумя слоями жидкости?
7. Напишите формулу Стокса.
8. Какие силы действуют на шарик, падающий в жидкости?
9. Запишите выражения для этих сил.
10. Назовите практическое значение явления внутреннего трения
11. Как называется прибор, используемый для измерения коэффициента внутреннего трения жидкости

4. ВИРТУАЛЬНЫЙ ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКЕ

Лабораторная работа 1 – 12
(виртуальная лабораторная работа)

ИЗУЧЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯМОЛЕКУЛ ГАЗА ПО СКОРОСТЯМ (РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАКСВЕЛЛА)

Цель работы: Изучение основ молекулярно-кинетической теории газов. Экспериментальная проверка закона Максвелловского распределения молекул идеального газа по скоростям и определение молярной массы газа на компьютерной модели.

Приборы и принадлежности: ПК, программа «Открытая физика» (компьютерная модель).

Теоретические сведения

В молекулярно-кинетической теории пользуются *идеализированной моделью идеального газа*, в которой предполагается, что потенциальной энергией взаимодействия молекул можно пренебречь по сравнению с их кинетической энергией. Между молекулами не действуют силы притяжения или отталкивания, соударения частиц между собой и со стенками сосуда абсолютно упруги, а время взаимодействия между молекулами пренебрежимо мало по сравнению со средним временем между столкновениями. В процессе становления молекулярно-кинетической теории газов некоторое время считалось, что все молекулы газа в условиях термодинамического равновесия движутся с одинаковыми скоростями. Однако движение происходит в разных направлениях, тогда столкновения молекул происходят под различными углами. Это должно приводить к изменению скорости сталкивающихся молекул. Столкновения молекул газа между собой носят случайный характер, следовательно, их скорости должны являться случайными физическими величинами. Область возможных значений этой физической величины ничем не ограничена, поэтому скорости молекул в газе в условиях термодинамического равновесия – непрерывная случайная величина, для описания которой необходимо построить соответствующую функцию распределения. Функция распределения молекул газа по скоростям была выведена Дж. Максвеллом в 1859 г. и носит его имя. Газ находится в состоянии термодинамического равновесия, в отсутствии внешних полей, действие которых могло бы изменить скорости хаотически движущихся молекул. Частицы газа движутся равномерно и прямолинейно, направление движения совпадает с направлением скорости.

Рассмотрим идеальный газ, находящийся в равновесном состоянии. Вследствие огромного числа соударений, испытываемых молекулой в единицу времени, скорости газовых молекул все время изменяются. Поэтому в любой момент времени имеются молекулы, движущиеся с различными скоростями. Пусть в системе имеется N молекул. Тогда число молекул dN, движущихся со скоростями, лежащими в интервале $d\upsilon$ вблизи заданной скорости υ

$$dN = f(\upsilon)d\upsilon N, \tag{1}$$

где $f(\upsilon)$ – функция распределения Максвелла молекул идеального газа по величине скорости.

Из (1) следует

$$f(\upsilon) = \frac{dN}{Nd\upsilon} \tag{2}$$

Т.е. функция распределения молекул равна относительному числу молекул, которые имеют значения скорости, лежащие в единичном интервале $d\upsilon$ вблизи заданной скорости υ

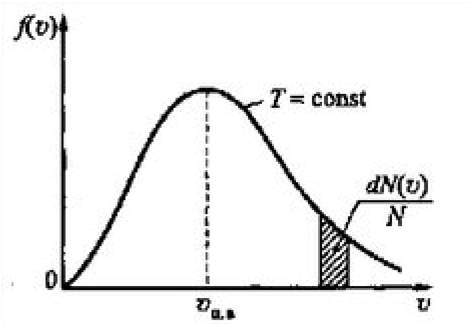


Рисунок 1 – Вид функции распределения молекул по скоростям – распределение Максвелла

Вид функции (рис. 1) распределения молекул по модулю скорости установил Максвелл

$$f(\upsilon) = 4\pi\left(\frac{m}{2\pi kT}\right)^{3/2} e^{-\frac{m\upsilon^2}{2kT}}\upsilon^2, \tag{3}$$

где $k = 1{,}38\cdot10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана, m – масса одной молекулы, T – абсолютная температура.

Средняя арифметическая скорость молекулы

$$\langle\upsilon\rangle = \int_0^\infty \upsilon f(\upsilon)d\upsilon = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}, \tag{4}$$

где $R = 8{,}31$ Дж/(моль$\cdot$К) – универсальная газовая постоянная, μ – молярная масса газа. *Молярная масса газа (или вещества)* — это отношение массы газа к количеству молей этого газа, то есть масса одного моля газа (вещества). В системе СИ молярная масса выражается в кг/моль (или г/моль).

Средняя квадратичная скорость

$$\upsilon_{ср.кв} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}} \qquad (5)$$

Наиболее вероятной называется скорость, при которой функция распределения молекул идеального газа принимает максимальное значение

$$\upsilon_{вер} = \sqrt{\frac{2kT}{m}} = \sqrt{\frac{2RT}{\mu}} \qquad (6)$$

Из формулы видно, что при повышении температуры максимум функции распределения молекул по скоростям сместится вправо (значение наиболее вероятной скорости становится больше) (рис. 2). Однако площадь, ограниченная кривой, остается неизменной, поэтому при повышении температуры кривая распределения молекул по скоростям будет растягиваться и понижаться.

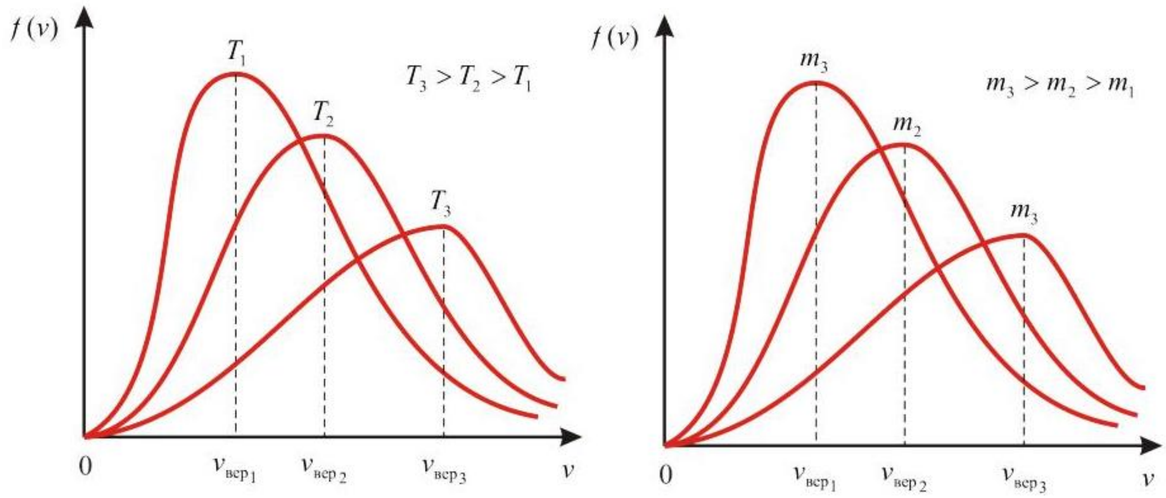


Рисунок 2 – Функции распределения молекул по скоростям в зависимости от температуры и массы

Содержание компьютерной модели, порядок выполнения работы и обработка результатов измерений

Запустите программу «Открытая физика». После этого на экране появится картинка «Содержание», на которой выбирается раздел «Термодинамика и молекулярная физика». Установите курсор мыши на название этого раздела и дважды щелкнуть левой клавишей мыши. В появившемся на экране содержании раздела выберите лабораторную работу «Распределение Максвелла». Вы увидите картинку компьютерной модели (рис.3).

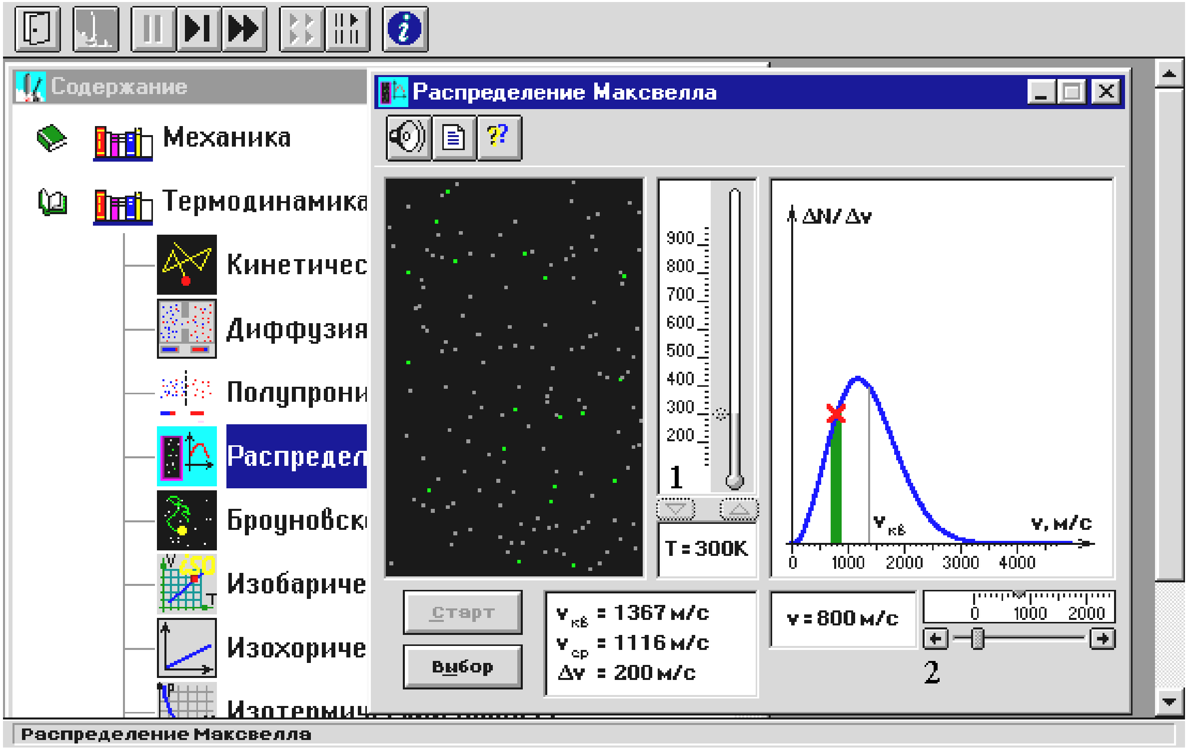


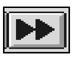
Рисунок 3 – Компьютерная модель «Распределение Максвелла»

В левой части картинки изображена модель замкнутого объема - черный прямоугольник, в котором находится около 100 частиц. При движении частицы упруго сталкиваются друг с другом, хорошо моделируя движение молекул идеального газа.

Интенсивность движения молекул связана с температурой в объеме, значение которой можно установить с помощью переключателя **1**, см. рис.3

С помощью переключателя **2** можно выделить на модели молекулы яркими зелеными точками, скорости которых находятся в диапазоне скоростей $\Delta\upsilon$ вблизи заданной скорости υ.

Движение частиц в объеме можно остановить, нажав мышью расположенную вверху картинки кнопку , что позволяет наблюдать неподвижным расположение всех молекул модели в данный момент времени.

Для продолжения наблюдения движения молекул надо нажать на кнопку .

Порядок выполнения работы.

1. Узнать у преподавателя значение температур T газа, при которых необходимо исследовать модель идеального газа, и записать эти значения в таблицу №1.

2. Нажмите последовательно кнопки «▶▶», «**СТАРТ**», «**ВЫБОР**» и с помощью переключателя **1**, см. рис.3, установите заданную температуру T.

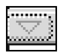
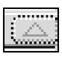
Для этого установите курсор мыши на кнопке переключателя  для уменьшения температуры или на кнопке  для увеличения температуры и, нажимая левую кнопку мыши, установите заданное значение температуры. После этого нажмите кнопку «**СТАРТ**».

Таблица №1

T (К)	Значения υ выбирать из диапазона значений от 300 м/с до 3500 м/с								$\upsilon_{вер}$ (м/с)	$\upsilon_{вер}^{2}$ (м^2/с^2)
	υ (м/с)									
	ΔN									
	υ (м/с)									
	ΔN									
	υ (м/с)									
	ΔN									
	υ (м/с)									
	ΔN									

3. Выделите на модели газа группу молекул, имеющих скорости вблизи значения υ.

Значение скорости υ выбирают из диапазона значений скорости от 300 м/с до 3500 м/с. В пределах этого диапазона выбирают 5 – 7 значений скоростей молекул и вначале устанавливают наименьшее из них, затем следующее большее и т.д.

Установку значения скорости υ осуществляют переключателем **2**, см. рис.3, для чего устанавливают стрелку курсора мыши на движок переключателя **2**, нажимают левую кнопку мыши и, удерживая её в нажатом положении, перемещают движок мышью до необходимого значения скорости.

4. Нажмите кнопку « || » и подсчитайте на модели число молекул ΔN (зеленые точки), скорости которых имеют величину близкую к установленной скорости молекул υ. Значения скорости υ и числа молекул ΔN записать в таблицу №1.

5. Нажмите кнопку «▶▶» и затем измените скорость υ до следующего значения из указанного выше диапазона скоростей, как описано в пункте 3. Далее выполните измерение, как описано в пункте 4.

6. Повторите измерения по пунктам 3, 4, 5 семь раз для разных значений скоростей.

7. Установите, как описано в пункте 2, следующее значение температуры T и повторите измерения, как описано в пунктах 3 – 6.

8. Выполните аналогичные измерения для всех температур газа, указанных преподавателем.

Обработка результатов измерений.

1. Постройте на одном рисунке графики функции $\Delta N = f(\upsilon)$ зависимости числа молекул ΔN от скорости молекул υ для разных значений температур

T , откладывая по оси абсцисс значения скорости, а по оси ординат – число молекул.

При построении графика по экспериментальным точкам надо провести плавную кривую.

2. По построенным графикам определите наиболее вероятные скорости $\upsilon_{вер}$ молекул газа при разных температурах, рассчитать $\upsilon_{вер}{}^2$. Найденные значения запишите в таблицу №1.

3. Постройте график зависимости квадрата наиболее вероятной скорости от температуры $\upsilon_{вер}{}^2 = f(T)$.

4. По последнему графику, воспользовавшись формулой (6) $\upsilon_{вер} = \sqrt{\dfrac{2RT}{\mu}}$ определите молярную массу газа

$$\mu = 2R\frac{\Delta T}{\Delta \upsilon_{вер}^2} \tag{7}$$

Здесь R – молярная газовая постоянная, ΔT – изменение температуры газа приводящее к изменению квадрата наиболее вероятной скорости на $\Delta\upsilon_{вер}{}^2$

Определите газ, молярная масса которого достаточно близка к рассчитанной молярной массе.

Контрольные вопросы

1. В чем состоит модель газа – идеальный газ. При каком состоянии газа можно пользоваться этой моделью для его описания.
2. Приведите математическое выражение закона распределения Максвелла и определите величины, входящие в это уравнение.
3. Изобразите график распределения Максвелла молекул идеального газа по скоростям.
4. Какие выводы следуют из вида кривой распределения?
5. Как изменяется вид кривой распределения при изменении температуры газа и с чем эти изменения связаны?
6. Зависит ли площадь на графике, ограниченная кривой распределения и осью абсцисс, от температуры газа?
7. Какая скорость молекул газа называется наиболее вероятной скоростью?
8. Приведите формулы для расчета средней арифметической, средней квадратичной и наиболее вероятной скоростей молекул идеального газа.
9. Дайте определение молярной массы газа.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Основные физические константы

Гравитационная постоянная	$G = 6{,}6720 \cdot 10^{-11}$ Н·м²/кг²
Скорость света в вакууме	$c = 2{,}99792458 \cdot 10^{8}$ м/с
Магнитная постоянная	$\mu_0 = 1{,}25663706144 \cdot 10^{-6}$ Гн/м
Электрическая постоянная	$\varepsilon_0 = 8{,}85418782 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
Постоянная Планка	$h = 6{,}626176 \cdot 10^{-34}$ Дж·с
Масса покоя электрона	$m_e = 9{,}109534 \cdot 10^{-31}$ кг
Масса покоя протона	$m_p = 1{,}6726485 \cdot 10^{-27}$ кг
Масса покоя нейтрона	$m_n = 1{,}6749543 \cdot 10^{-27}$ кг
Заряд электрона	$e = 1{,}6021892 \cdot 10^{-19}$ Кл
Атомная единица массы	$1{,}660565 \cdot 10^{-27}$ кг
Постоянная Авогадро	$N_A = 6{,}022045 \cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$
Постоянная Фарадея	$F = 96484.56$ Кл/моль
Молярная газовая постоянная	$R = 8{,}31441$ Дж/(моль·К)
Постоянная Больцмана	$k = 1{,}380662 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Нормальный (молярный) объем идеального газа при нормальных условиях	$V_0 = 2{,}241 \cdot 10^{-2}$ м³/моль
Нормальное атмосферное давление	$P_{атм.} = 101325$ Па
Ускорение свободного падения	$g = 9{,}80665$ м/с²

Приставки для образования

десятичных кратных и дольных единиц СИ

кратные приставки			дольные приставки		
наименование	обозначение	множитель	наименование	обозначение	множитель
йотта	И	10^{24}	деци	д	10^{-1}
зетта	З	10^{21}	санти	с	10^{-2}
экса	Э	10^{18}	милли	м	10^{-3}
пэта	П	10^{15}	микро	мк	10^{-6}
тера	Т	10^{12}	нано	н	10^{-9}
гига	Г	10^{9}	пико	п	10^{-12}
мега	М	10^{6}	фемто	ф	10^{-15}
кило	к	10^{3}	атто	а	10^{-18}
гекто	г	10^{2}	зепто	з	10^{-21}
дека	да	10^{1}	йокто	и	10^{-24}

Греческий алфавит

$A\ \alpha$ – альфа	$\mathrm{H}\ \eta$ – эта	$\mathrm{N}\ \nu$ – ню	$\mathrm{T}\ \tau$ – тау
$B\ \beta$ – бета	$\Theta\ \theta$ – тэта	$\Xi\ \xi$ – кси	$Y\ \upsilon$ – ипсилон
$\Gamma\ \gamma$ – гамма	$\mathrm{I}\ \iota$ – йота	$\mathrm{O}\ o$ – омикрон	$\Phi\ \varphi$ – фи
$\Delta\ \delta$ – дельта	$\mathrm{K}\ \kappa$ – каппа	$\Pi\ \pi$ – пи	$\mathrm{X}\ \chi$ – хи
$\mathcal{E}\ \varepsilon$ – эпсилон	$\Lambda\ \lambda$ – ламбда	$\mathrm{P}\ \rho$ – ро	$\Psi\ \psi$ – пси
$\mathrm{Z}\ \zeta$ – дзета	$\mathrm{M}\ \mu$ – мю	$\Sigma\ \sigma$ – сигма	$\Omega\ \omega$ – омега

Таблица единиц измерения

ОСНОВНЫЕ ЕДИНИЦЫ СИСТЕМЫ СИ

Название физической величины	*Единица измерения*	*Обозначение*	*Определение единицы*
Длина	метр	м	Метром называют длину пути, которой проходит свет за время равное 1/299792458 с
Масса	килограмм	кг	Эталон массы для СИ является гиря, состоящая из сплава платины и иридия массой 1 кг
Время	Секунда	с	Одной секундой называют интервал времени, который равен 9192631779 периодам излучения, который соответствует переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия
Сила электрического тока	Ампер	А	Один Ампер – это сила тока, проходящего в двух прямых бесконечно тонких и длинных проводниках, находящихся в вакууме на расстоянии 1 метр, порождающая силу Ампера равную $2\cdot10^{-7}$ Н на каждый метр проводника
Термодинамическая температура	Кельвин	К	Один кельвин – это термодинамическая температура равная 1/273,16 части от температуры тройной точки воды
Количество вещества	моль	моль	Один моль – это количество вещества в котором имеется столько же атомов, сколько их содержится в 0,012 кг углерода
Сила света	кандела	кд	Одна кандела равна силе света, который пропускает монохроматический источник частотой $540\cdot 10^{12}$ Гц с энергетической силой в направлении излучения 1/683 Вт/ср

ПРОИЗВОДНЫЕ ЕДИНИЦЫ СИСТЕМЫ СИ

Название физической величины	*Единица измерения*	*Обозначение*	*Определяющее уравнение*
Площадь поверхности	Метр в квадрате	м^2	$S=1^2$
Скорость	Метр в секунду	м/с	$\upsilon = s / t$
Ускорение	Метров на секунду в квадрате	м/с^2	$a = (\upsilon_2 - \upsilon_1) / t$
Плотность	Килограмм на кубический метр	кг/м^3	$\rho = m / V$
Сила	Ньютон	Н	$F = ma$
Давление	Паскаль	Па	$P = F / S$

Мощность	Ватт	Вт	$N = A / t$
Энергия, работа	Джоуль	Дж	-
Количество теплоты	Джоуль	Дж	-
Электрический заряд	Кулон	Кл	$q = It$
Частота вращения	Секунда в минус первой степени	$с^{-1}$	-
Частота периодического вращения	Герц	Гц	-

ЛИТЕРАТУРА

Бондарев, Б. В.
Курс общей физики [Текст]: в 3 книгах: учебное пособие для втузов / Б. В. Бондарев, Н. П. Калашников, Г. Г. Спирин.– Москва: Высшая школа, 2003 –. Кн.1: Механика.-352 с. – ISBN 5-06-004603-6: - Текст: непосредственный
Грабовский, Р.И.
Курс физики: учебное пособие для вузов / Р. И. Грабовский. -6-е изд. – Санкт-Петербург: Лань, 2002. – 607 с.: ил.- (Учебник для вузов. Специальная литература). – ISBN 5-8114-0466-2: -Текст: непосредственный.
Детлаф, А. А..
Курс физики: учебное пособие для втузов / А. А. Детлаф, Б.М Яворский.-4-е изд., испр. – Москва: Высшая школа, 2002.– 718 с. – ISBN 5-06-003556-5: - Текст: непосредственный
Трофимова Т. И.
Курс физики: учебное пособие для вузов / Т. И. Трофимова. -7-е изд., стер.- Москва: Высшая школа, 2002. – 542 с. . – ISBN 5-06-003634-0: - Текст: непосредственный
ВикипедиЯ : Свободная энциклопедия : сайт. – https://ru.wikipedia.org/ (дата обращения: 10.12.2019). Текст: электронный

СОДЕРЖАНИЕ