РАБОТА № 1

ИЗУЧЕНИЕ ДИНАМИКИ ВРАЩАТЕЛЬНОГОДВИЖЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МАЯТНИКА ОБЕРБЕКА

Цель работы: определить характер движения, момент инерции маятника Обербека при различных положениях перемещаемых грузиков, проверить закон сохранения энергии.

Оборудование: прибор Обербека, грузы для приведения крестовины во вращение, стойка с делениями, секундомер, штангенциркуль.

Расчётные формулы: $\upsilon = \upsilon_0 + at$; $\omega = \upsilon/t$; $J = \dfrac{mR^2(g-a)}{a}$;

$$W_p = mgh; \quad W_k = \frac{m\upsilon^2}{2}; \quad W_k = \frac{J\omega^2}{2};$$

Маятник Обербека, с помощью которого исследуется зависимость между величинами, входящими в выражение основного закона динамики вращательного движения, представляет собой крестовину (рис. 3), вращающуюся вокруг горизонтальной оси. На шкив наматывается нить, к концу которой прикреплен груз массой m.

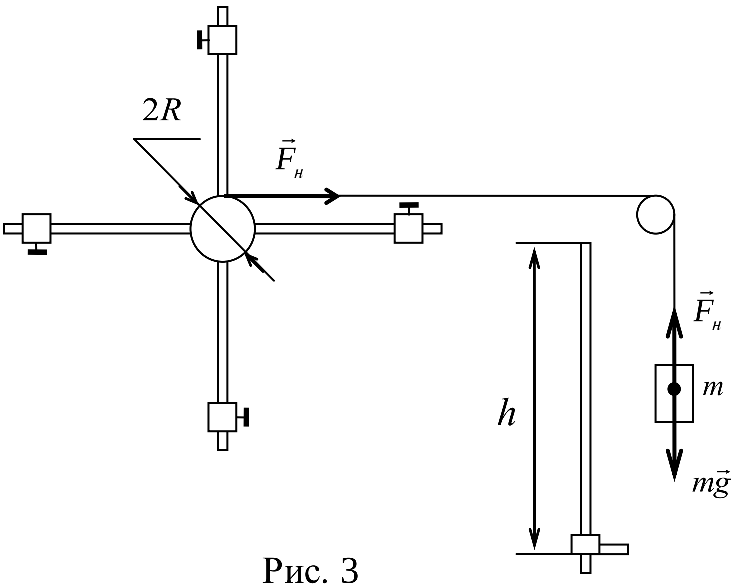

Рис. 3

При опускании груза сила натяжения нити приводит во вращение крестовину. На стержнях крестовины с помощью винтов на равных расстояниях от оси вращения укрепляют четыре одинаковых груза, размеры которых малы по сравнению с их расстоянием от оси вращения.

Во время движения крестовина вращается под действием момента $\vec{M}_н$ силы натяжения нити $\vec{F}_н$, который определяется соотношением

$$\vec{M}_н = \vec{R} \times \vec{F}_н, \tag{1}$$

где R — радиус шкива, на который намотана нить.

Второй закон Ньютона для вращательного движения твёрдого тела вокруг закрепленной оси определяет зависимость углового ускорения $\vec{\varepsilon}$ маятника от суммарного момента $\vec{M}$ действующих на него сил:

$$\vec{M} = I\vec{\varepsilon}\,. \tag{2}$$

Здесь I — *момент инерции* маятника Обербека относительно оси вращения.

Момент инерции тела играет ту же роль, что и масса тела при поступательном движении, т.е. является *мерой инертности* тела. Его величина зависит не только от массы тела, но и от того, как эта масса распределена относительно оси вращения. Момент инерции можно найти из закона движения (2) или вычислить по распределению масс:

$$I = \sum m_i r_i^2 \text{ , а для сплошного тела } I = \int r^2 dm\,.$$

При изменении положения грузиков момент инерции крестовины (маятника Обербека), что должно влиять на ускорение системы. Зная ускорение и массу груза m, можно вычислить момент инерции маятника Обербека.

Задание 1. Определение характера движения и ускорения груза

Если измерить время t опускания груза с определенной высоты h, то среднее ускорение груза легко найти из кинематического уравнения равноускоренного движения:

$$h = \upsilon_0 t + \frac{at^2}{2}. \quad \text{При } \upsilon_0 = 0 \;\; h = \frac{a}{2} t^2. \tag{1.1}$$

Чтобы использовать уравнение (1), необходимо убедиться, что движение груза *равноускоренное*, т.е. a = const. Для этого, меняя высоту падения одного и того же груза, следует измерять время его движения. Если a – постоянная величина, то зависимость пройденного грузом пути h от квадрата времени t^2 должна быть прямой линией с угловым коэффициентом $\Delta h/\Delta t^2$, который в этом случае равен $a/2$ (см. уравнение (1.1)). Измерения проводят 5…7 раз, опуская груз (без толчка!) с одного и того же уровня, отмеченного на стойке.

Изменение высоты, на которую опускается груз, производится перемещением приёмной платформы. Положение платформы фиксируется пружинным стопором. Данные измерений заносят в табл. 1.1. Измерения проводят сначала с грузиками на концах, а затем с грузиками, сдвинутыми к середине крестовины.

В заголовке таблицы запишите массу груза и радиус шкива, которые потребуются для расчётов при оформлении отчёта по лабораторной работе. Радиус шкива определяют по его диаметру, который измеряется штангенциркулем.

m = …. R = ….   Таблица 1.1

№	Грузики на концах			Грузики у оси		
п.п	h, м	t, с	t^2, с^2	h, м	t, с	t^2, с^2
1						
2						
…						
…						

Обработка результатов измерений

1. Вычислите и запишите в таблицу значения t^2.
2. По данным таблицы постройте два графика зависимости пройденного грузом пути h от t^2. Графики нужно строить в одной системе координат, чтобы наглядно показать их отличия. При проведении усредняющих прямых нужно учесть, что они должны проходить через начало координат.
3. По графикам определите ускорения a_1 и a_2 в СИ с разумной точностью. Оцените погрешность определения ускорений.
4. Сравните ускорения a_1 и a_2, найденные из графиков. При каком расположении грузиков ускорение больше и почему?

Задание 2. Определение момента инерции маятника Обербека и проверка закона сохранения энергии

<u>*Напоминание*</u>: Все вычисления нужно проводить в единицах СИ! Укажите эти единицы измерения в заголовке таблицы 1.2.

1. Вычислите значения моментов инерции маятника Обербека, используя значения ускорений a_1 и a_2, которые Вы определили из графиков. Результаты вычислений запишите в табл.1.2.
2. Оцените погрешность определения момента инерции
3. По ускорениям a_1 и a_2, определённым в п. 3, вычислите конечную скорость груза υ и угловую скорость крестовины ω для одной из высот (по указанию преподавателя) при двух расположениях грузиков. Полученные значения запишите в табл. 1.2.

4. Вычислите начальную энергию системы груз–крестовина (при $t = 0$), и энергию системы в момент удара груза о платформу, запишите в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Положение грузиков	h, м	J	υ	ω	W_p	$(W_k)_г$	$(W_k)_м$	W	кпд
На концах	…								
У середины									

5. Найдите работу сил трения, определите коэффициент полезного действия и процент потерь механической энергии.
6. Сформулируйте общий вывод по проделанной работе

РАБОТА № 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ АДИАБАТЫ МЕТОДОМ КЛЕМАНА — ДЕЗОРМА

<u>*Цель работы*</u>*:* ознакомиться с газовыми процессами, определить показатель адиабаты и число степеней свободы молекул воздуха.

<u>*Оборудование*</u>*:* специальная установка с насосом и манометром.

Теория метода и описание установки

Применяемый в данной работе прибор Клемана — Дезорма схематически изображен на рис. 6. Он представляет собой стеклянный баллон, плотно закрытый пробкой. Через пробку пропущены трубки. Одна из трубок имеет кран K_2, позволяющий устанавливать и прерывать сообщение баллона с атмосферой. Другая трубка соединена с водяным U-образным манометром с одной стороны и с ручным воздушным насосом с другой. Нагнетая насосом воздух в баллон, и быстро выпуская его, можно осуществить *адиабатический процесс,* проходящий, по определению, *без обмена теплом* с окружающей средой.

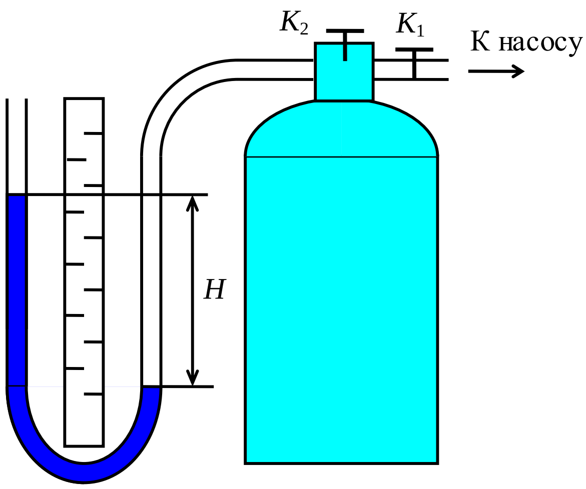

Рис. 6

Как известно, изменение объема связано с изменением давления. В случае адиабатического процесса эта зависимость называется уравнением Пуассона:

$$PV^{\gamma} = \text{const}. \qquad (1)$$

Показатель адиабаты γ является важной термодинамической величиной, характеристикой газа. Он равен отношению теплоёмкости газа при постоянном давлении C_p к теплоёмкости этого же газа при постоянном объеме C_V, то есть

$$\gamma = \frac{C_P}{C_V}. \qquad (2)$$

Теплоёмкостью называется количество теплоты, необходимое для нагревания тела или системы на один градус:

$$C = \frac{dQ}{dT}. \qquad (3)$$

Величина теплоёмкости газа зависит от условий, при которых происходит нагревание. Если нагревать газ *при постоянном объеме,* то всё тепло, сообщаемое газу извне, полностью идёт на увеличение внутренней энергии. Если же нагревать его *при постоянном давлении,* то газ расширяется, при этом сообщаемое газу тепло идёт не только на увеличение внутренней энергии, но и на совершение работы изобарического расширения. Поэтому теплоёмкость газов при постоянном давлении больше, чем при постоянном объеме. Для *идеального газа* справедливо следующее соотношение между *молярными* теплоёмкостями:

$$C_P^{\mu} = C_V^{\mu} + R, \tag{4}$$

причем теплоёмкость пропорциональна *числу степеней свободы* молекул газа i:

$$C_V^{\mu} = \frac{i}{2} R, \tag{5}$$

где R — универсальная газовая постоянная.

Показатель адиабаты можно определить экспериментально, если осуществить ряд газовых процессов в воздухе, заключенном в сосуде. Очевидно, как следует из выражений (2), (4) и (5), по измеренному значению γ можно также найти число степеней свободы молекул газа.

Известно, что любое *состояние газа* характеризуется определенными значениями параметров P, V и T. *Процесс* — это переход из одного состояния в другое, т.е. изменение параметров. Покажем, что показатель адиабаты γ можно определить, осуществив три состояния газа (рис. 7) и записав последовательно уравнения процессов.

1. Газ в состоянии 1, полученном после нагнетания воздуха в сосуд и установления температуры T_1, равной комнатной, имеет параметры: $P_1 = P_{ат} + H$, где H — избыточное давление в сосуде над атмосферным давлением $P_{ат}$ (см. рис. 7); V_1 — объем единицы массы воздуха в сосуде. На графике (см. рис. 7) этому состоянию соответствует точка 1.

2. Если теперь на короткое время соединить сосуд с атмосферой, открыв кран K_2, то воздух в баллоне расширится и перейдет в состояние 2 с давлением $P_2 = P_{ат}$. Единица массы газа займет объем $V_2 > V_1$, температура понизится до некоторого значения $T_2 < T_1$ (см. рис. 7, точка 2). Переход газа из состояния 1 в состояние 2 можно считать *адиабатическим процессом*, поскольку за время расширения газ в сосуде не успевает обменяться теплом с окружающей средой.

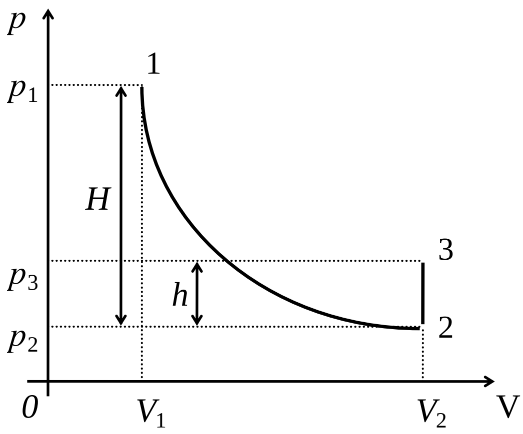

Рис.7

Для адиабатического перехода из состояния 1 в состояние 2 справедливо уравнение Пуассона (1):

$$P_1 V_1^{\gamma} = P_2 V_2^{\gamma}. \tag{6}$$

3. Воздух, оставшийся в сосуде, сохраняя объем постоянным ($V_3 = V_2$), постепенно нагревается до комнатной температуры ($T_3 = T_1$) и давление повышается до значения $P_3 = P_{ат} + h$ (точка 3 на рис. 7).

Газ в состояниях 3 и 1 имеет одну и ту же комнатную температуру. Значит, эти состояния можно связать уравнением Бойля — Мариотта:

$$P_1 V_1 = P_3 V_3. \tag{7}$$

Из уравнений (6) и (7) легко получить связь между давлениями

$$\left(\frac{P_1}{P_3}\right)^{\gamma} = \frac{P_1}{P_2}, \tag{8}$$

и, логарифмируя последнее равенство, определить показатель степени

$$\gamma = \frac{\ln P_1 - \ln P_2}{\ln P_1 - \ln P_3} = \frac{\ln(P_{ат} + H) - \ln P_{ат}}{\ln(P_{ат} + H) - \ln(P_{ат} + h)}. \tag{9}$$

Учитывая, что H и h много меньше $P_{ат}$ ($\approx$ в 100 раз), и используя формулу приближённых вычислений: $\ln(1+x) \approx x$ (при $x << 1$), можно получить расчётную формулу для показателя адиабаты

$$\gamma = \frac{H}{H - h}. \tag{10}$$

Задание 1. **Определение показателя адиабаты атмосферного воздуха**

Для выполнения задания нужно осуществить в сосуде последовательно три состояния, описанные выше.

1. Чтобы получить первое состояние газа с повышенным давлением, открывают кран K_1 (см. рис. 6) и закачивают насосом воздух в баллон. Закачивание следует производить медленно, следя за тем, чтобы жидкость в U-образном манометре не поднималась выше красной отметки на его шкале. Закрывают кран K_2 и ожидают некоторое время (2–3 мин), пока температура в баллоне не сравняется с комнатной и разность уровней жидкости в обоих коленах манометра не установится постоянной. Отсчитывают разность H уровней жидкости в коленах манометра и записывают ее в табл. 4.1.

2. Открывают полностью кран K_2, устанавливая сообщение баллона с атмосферой и сразу закрывают его. Часть воздуха из баллона выходит в комнату — идет процесс расширения. Расширение быстрое, то есть практически адиабатическое. Газ переходит в состояние 2 с пониженной температурой.

3. Выжидают 2–3 мин, пока температура воздуха в баллоне не сравняется с комнатной (состояние 3), о чем можно судить по тому, что разность уровней жидкостей в коленах манометра перестаёт изменяться.

Отсчитывают эту разность h и заносят в таблицу. Опыт повторяют 7–10 раз, меняя величину H.

Таблица 4.1

№ п.п.	H	h	$H - h$	γ
1				
2				
3				
…				
…				

Задание 2. **Определение числа степеней свободы**

По полученному значению показателя адиабаты найти среднее значение числа i степеней свободы молекул воздуха, сравнить с теоретическим значением и оценить погрешность определения i.

Контрольные вопросы

1. Дайте определения моля и молярной теплоёмкости.
2. Почему теплоёмкость газа зависит от условий передачи тепла газу?
3. Чему равны молярные теплоёмкости идеального газа при $p = const$ и при $V = \text{const}$?
4. Какова связь между теплоёмкостями при постоянном давлении и при постоянном объеме?
5. Опишите диаграмму на рис. 7.
6. Выведите формулу для определения числа степеней свободы i от показателя адиабаты γ.
7. Выведите формулы (8), (9) и (10).
8. Дайте определение адиабатического процесса и запишите его уравнение. Сравните графики изотермического и адиабатического процессов.
9. Как изменяются температура и внутренняя энергия при адиабатическом процессе?
10. Что называется числом степеней свободы? Чему равно это число для газов с различным числом атомов в молекуле?