

ИЗМЕРЕНИЕ УСКОРЕНИЯ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ

Цель работы: определить ускорение свободного падения посредством прямых измерений ускорения падающего тела.

В работе используются: вертикальная труба с намотанными катушками; шарообразные неодимовые магниты; линейка; блок регистрации сигнала (микроконтроллер с АЦП), соединённый с цифровым осциллографом.

В данной лабораторной работе ускорение свободного падения g определяется при помощи измерения времени падения металлического шарика в поле тяжести Земли. Экспериментальная установка приведена на рис.1. Металлический шарик (неодимовый магнит) первоначально удерживается сверху электромагнитом в подвешенном состоянии. После выключения тока, текущего через электромагнит, шарик начинает падать вниз и пролетает последовательно через шесть тонких проволочных катушек. С катушками соединены датчики электрического напряжения и регистраторы времени (таймеры). Шарик имеет собственную намагниченность (является постоянным магнитом), поэтому, когда он пролетает сквозь проволочную катушку, он своим магнитным полем наводит в катушке индукционный ток. Этот ток регистрируется электрическим датчиком, соединённым с катушкой. По возникающему импульсу напряжения срабатывает таймер, соединённый с данной катушкой.

Все датчики подключены к блоку управления и регистрации. Начало отсчёта времени $t = 0$ соответствует пролёту шариком самой верхней катушки. Каждый из таймеров регистрирует время пролёта шариком соответствующей катушки. Расстояние между соседними катушками одинаково и равно $l \approx 40$ см (точные значения указаны на установке или могут быть измерены непосредственно). На таком же расстоянии находится шарик в подвешенном состоянии над верхней катушкой.

После пролёта всех катушек шарик попадает в металлическую трубку, в которой он тормозится перед падением на пол (*электромагнитное торможение*). Механизм торможения заключается в том, что так же, как и в катушках, в металлической трубке наводятся индукционные токи (токи Фуко), которые, в соответствии с правилом Ленца, своим магнитным полем тормозят движение шарика. Заметим, что шарик будет неизбежно испытывать некоторое торможение и при пролёте каждой катушки. Однако этот эффект можно свести к минимуму, если сопротивление цепи катушки достаточно велико, и, следовательно, возникающие токи, а значит и силы, малы.

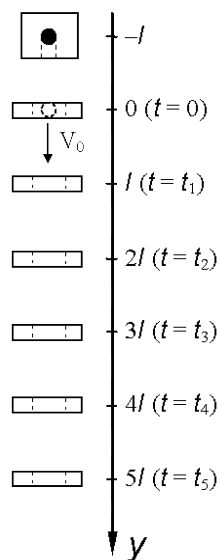


Рис. 1. Схема опыта

Импульсы тока от всех катушек также регистрируются на экране запоминающего осциллографа. По картине импульсов на экране осциллографа можно примерно определить время пролёта шариком каждой из катушек и сравнить это время с соответствующим значением таймера. Согласно закону электромагнитной индукции

$$\mathcal{E} = -\frac{d\Phi}{dt}$$

напряжение в цепи регистрации пропорционально *производной* магнитного потока от шарика через регистрирующую катушку. Поэтому, когда шарик будет находится в центре регистрирующей катушки, поток магнитного поля через неё будет максимален, что будет соответствовать *нулю* регистрируемого сигнала. Характерный вид осциллограммы представлен на рис. 2. Конкретные амплитуды и форма отдельных импульсов могут меняться как для разных катушек, так и от опыта к опыту: они зависят от ориентации намагничённости шарика относительно катушки в момент пролёта (импульсы с большой амплитудой соответствуют случаю, когда намагничённость шарика направлена вертикально).

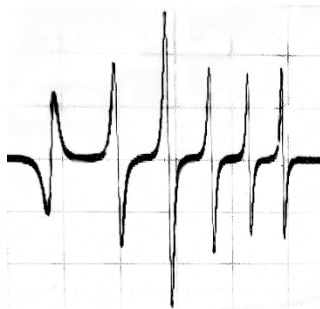


Рис. 2. Характерная осциллограмма (зависимость напряжения от времени) в эксперименте

Рассмотрим падение шарика из его начального положения, когда он удерживается электромагнитом. Направим ось y вертикально вниз, а начало отсчёта $y = 0$ совместим с положением самой верхней катушки (рис. 1).

Пусть v_0 – скорость шарика в центре самой верхней катушки. Для равноускоренного движения шарика справедливо выражение:

$$y = v_0 t + \frac{gt^2}{2}. \quad (1)$$

Выражение (1) можно записать для пяти моментов времени t_n ($n = 1, 2, 3, 4, 5$), соответствующих пролёту шарика через соответствующую катушку:

$$nl = v_0 t_n + \frac{gt_n^2}{2}. \quad (2)$$

Перепишем выражение (2) в виде

$$\frac{nl}{t_n} = v_0 + \frac{gt_n}{2}. \quad (3)$$

Проводя измерения времён t_n при свободном падении шарика и используя выражение (3), можно построить график зависимости величины nl/t_n от t_n и определить ускорение свободного падения из углового коэффициента данной зависимости.

Влияние сопротивления воздуха*

Падение шарика в атмосфере не является полностью свободным: он, конечно, испытывает влияние сопротивления воздуха. Из-за этого измеряемое на

* Рекомендуется для ознакомления студентам, знакомым с началами гидродинамики.

опыте ускорение g окажется несколько меньше. Точный учёт силы сопротивления потребовал бы либо отдельного экспериментального исследования, либо решения сложной гидродинамической задачи в зависимости от скорости движения v . Однако оценить силу сопротивления *по порядку величины* можно в следующих двух упрощённых моделях.

При падении с малыми скоростями можно применить известную *формулу Стокса**:

$$F_{\text{сопр}} = 6\pi\eta r v, \quad (4)$$

где r — радиус шара, η — вязкость воздуха (при нормальном давлении и комнатной температуре $\eta \approx 1,85 \cdot 10^{-5}$ Па · с).

При больших скоростях обтекание шарика становится *турбулентным* и теория Стокса неприменима. Сила оказывается пропорциональна квадрату скорости и площади поперечного сечения шарика:

$$F_{\text{сопр}} = C \cdot \pi r^2 \rho v^2, \quad (5)$$

где ρ — плотность воздуха ($\rho \approx 1,2$ кг/м³), C — константа, зависящая от формы тела, которая для может быть установлена только экспериментально. Для шара известно экспериментальное значение $C_{\text{ш}} \approx 0,2$. Заметим, что формула (5) имеет прозрачный физический смысл: величина $\pi r^2 \rho v^2$ — это количество импульса, которое сообщали бы в секунду молекулы воздуха шарiku при неупругом ударе о него (убедитесь в том самостоятельно).

Критерием выбора между двумя моделями служит так называемое *число Рейнольдса*

$$\text{Re} = \frac{\rho v r}{\eta}. \quad (6)$$

По своему смыслу число Рейнольдса является отношением кинетической энергии течения жидкости (или газа) к работе сил трения. Формула Стокса (4) применима, когда влияние трения велико, а число Рейнольдса, соответственно, мало: $\text{Re} \lesssim 1$. Формула (5) будет, напротив, справедлива при достаточно больших числах $\text{Re} \gg 1$ (на практике при $\text{Re} > 50$).

В нашей работе высота падения составляет $H \approx 2$ м, что даёт максимальную скорость падения $v_{\text{max}} \approx \sqrt{2gH} \approx 6,3$ м/с (сила сопротивления в нашем опыте в любом случае мала, поэтому для грубой оценки скорости падения ей можно пренебречь). При радиусе шарика $r \approx 1$ см, получим $\text{Re}_{\text{max}} \sim 4 \cdot 10^3 \gg 1$. Следовательно, следует ожидать, что обтекание шарика воздухом в нашем опыте будет заведомо турбулентным почти с самого начала падения, а сила лобового сопротивления пропорциональна квадрату скорости согласно (5).

Оценить влияние сопротивления воздуха на измеряемое в опыте ускорение вертикального падения можно, вычислив среднюю величину силы (5) и соответствующее ей ускорение: $\Delta g \approx \overline{F_{\text{сопр}}}/m$, где m — масса шарика. Предлагаем студентам проделать эту оценку самостоятельно.

* Получена Дж. Г. Стоксом в 1851 году теоретически при решении уравнений вязкого течения жидкости, которые он сам же получил несколько лет ранее (уравнения Навье—Стокса).

ЗАДАНИЕ

1. Ознакомьтесь с экспериментальной установкой. Убедитесь, что расстояние l между соседними катушками одинаково. Измерьте и запишите это расстояние.
2. Включите электрическое питание блока управления и регистрации экспериментальной установки. При этом у электромагнита загорается красный световой индикатор.
3. Включите осциллограф. Ознакомьтесь с краткой инструкцией по работе с осциллографом, расположенной на столе. Следуя инструкции, подготовьте осциллограф к началу измерений (пункты 1–5).
4. Достаньте из футляра металлический шарик (неодимовый магнит). Измерьте его массу m и радиус r (или запишите значения, указанные на установке).

ВНИМАНИЕ! Шарик является **ОЧЕНЬ** сильным магнитом! Не допускайте его сближения с металлическими поверхностями и другими магнитами (это может привести к раскалыванию магнита или к травмам)! Не кладите его на рабочий стол без футляра. Убедитесь в отсутствии рядом чувствительных к магнитному полю предметов (компьютерная техника, пластиковые карты и пр.).

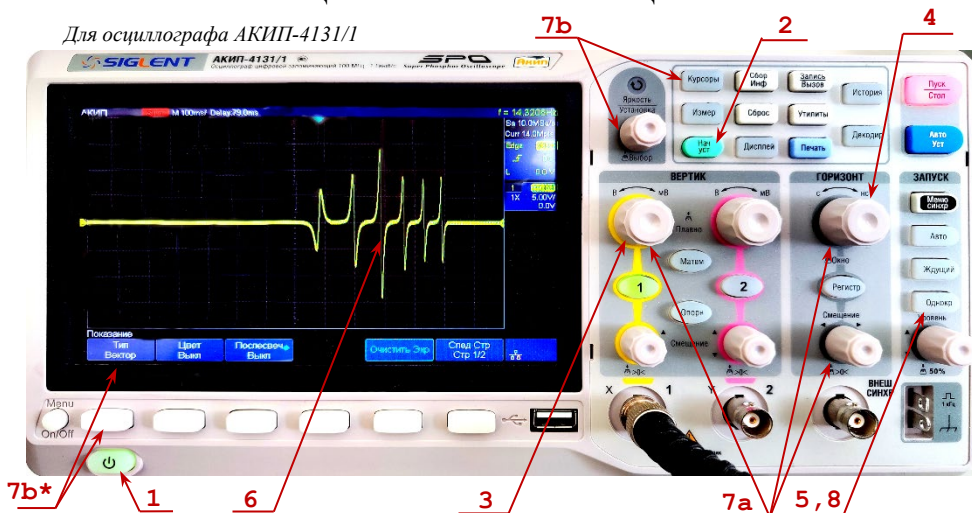
5. Положите шарик в пластиковый держатель, закреплённый на длинной металлической штанге, и поднесите его к установленному в верхней точке установки электромагниту так, чтобы он зафиксировался в нём.
6. При нажатии кнопки «Сброс» на блоке управления произойдёт размыкание электрической цепи электромагнита, и шарик свободно упадёт вниз. Наблюдайте на экране осциллографа осциллограмму сигнала от пролёта шарика.
7. С помощью осциллографа (пункт 7 Инструкции) измерьте времена пролёта магнита через катушки t_1, t_2, t_3, t_4, t_5 . Сравните результаты со значениями, отображаемыми на цифровом индикаторе блока регистрации.
8. Повторите опыт с падением шарика 7–10 раз и запишите все полученные значения времён t_n .
9. *По указанию преподавателя повторите опыты с шариками других диаметров. Сравнивая результаты, экспериментально оцените величину силы сопротивления воздуха в опытах (учтите, что при больших скоростях сила сопротивления пропорциональна площади поперечного сечения падающего тела и квадрату его скорости).
10. По полученным данным постройте графики зависимости nl/t_n от t_n и по угловому коэффициенту наилучшей прямой определите ускорение свободного падения. Усредните результаты опытов. Оцените погрешность результата.
11. *Оцените поправку к ускорению свободного падения из-за сопротивления воздуха. Сопоставьте исправленный результат с табличным значением ускорения свободного падения на широте проведения опыта.

Составитель:

Извекова Ю.Н., 2019. Исправлено Попов П.В. 27.09.2023

ИНСТРУКЦИЯ ПО РАБОТЕ С ОСЦИЛЛОГРАФОМ

Для осциллографа АКИП-4131/1



1. Включите осциллограф и дождитесь его загрузки.
2. Проведите сброс на настройки по умолчанию, нажав кнопку «Нач уст».
3. С помощью ручки регулировки масштабов «В↔мВ» для канала 1 (жёлтый) в блоке «ВЕРТИК» установите масштаб по вертикали 5.0 В / деление.
4. Ручкой регулировки масштаба горизонтальной развёртки «с ↔ нс» блока «ГОРИЗОНТ» установите масштаб развёртки 100 мс / деление.
5. Выберите режим однократного запуска: в блоке «ЗАПУСК» один раз нажмите кнопку «Однокр».
6. Запустите шарик (магнит), нажав «Пуск» на блоке управления установкой. При настройках по умолчанию осциллограф автоматически начнёт запись, когда «фронт» входящего сигнала перейдёт через уровень $V = 0$ В, что соответствует пролёту магнита через первое кольцо. Если всё прошло успешно, после падения шарика вы увидите на экране осциллографа сигнал, аналогичную изображённой на рисунке.
7. Измерения времён пролёта.
 - а. Увеличьте изображение одного из зарегистрированных пиков. Для этого перемещайте график ручкой «Смещение» блока «ГОРИЗОНТ» и изменяйте масштаб ручками регулировки масштаба вертикальной («В ↔ мВ») и горизонтальной («с ↔ нс») оси. Рекомендуемый масштаб по горизонтали для измерений – 5 мс / деление.
 - б. Включите режим *курсорных измерений*, нажав кнопку «Курсоры» в верхнем блоке. Вращая ручку «Установка», поместите курсор на точку пересечения сигнала с *уровнем нуля* и запишите соответствующее время t_n .

* Для удобства измерения можно включить режим «Слежение» с помощью первой кнопки горизонтального меню под экраном. В этом режиме курсор автоматически наводится на график сигнала, что позволяет сразу измерять как время, так и соответствующее напряжение.
 - в. Сместите график к следующему пику и повторите измерение.
8. Чтобы перейти к следующему опыту нажмите кнопку «Однокр» ещё раз – это запускает режим ожидания нового сигнала.