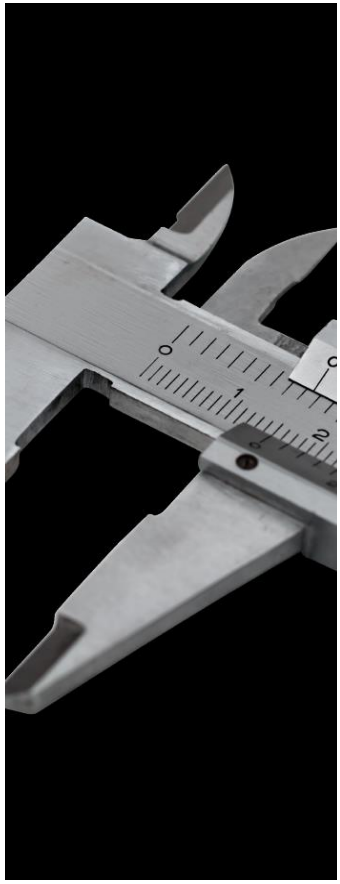
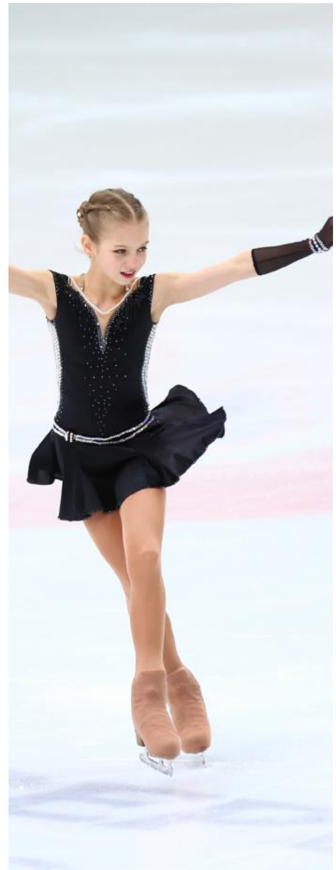
О.Н. Бочкарева, И.И. Беспаль





ФИЗИЧЕСКИЙ ПРАКТИКУМ

МЕХАНИКА

Министерство просвещения Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Южно-Уральский государственный
гуманитарно-педагогический университет»

О.Н. БОЧКАРЕВА, И.И. БЕСПАЛЬ

ФИЗИЧЕСКИЙ ПРАКТИКУМ

МЕХАНИКА

Учебно-методическое пособие

Челябинск
2021

УДК 531(021)
ББК 22.2я73
Б 86

Бочкарева, О.Н. Физический практикум. Механика: учебно-методическое пособие / О.Н. Бочкарева, И.И. Беспаль. – Челябинск: Изд-во Южно-Урал. гос. гуманитар.-пед. ун-та, 2021. – 101 с. – Текст: непосредственный.

ISBN 978-5-907409-76-7

В пособии представлены описания лабораторных работ по разделу «Механика» дисциплины «Общая и экспериментальная физика». Приведены основные соотношения, формулы и законы, которые составляют теоретическое обоснование представленных работ. Для организации самостоятельной работы студентов при подготовке к лабораторным занятиям приведены задания по подготовке к работе и вопросы к защите.

Поскольку раздел «Механика» обычно изучается в начале всего курса общей и экспериментальной физики, в первой части пособия представлена методика проведения лабораторного практикума по общей и экспериментальной физике и оценки точности и качества измерений.

Пособие предназначено для преподавателей физики, студентов, изучающих курс общей и экспериментальной физики педвузов.

Рецензенты: В.П. Андрейчук, канд. физ.-мат. наук
Н.А. Векессер, канд. физ.-мат. наук

ISBN 978-5-907409-76-7

ВВЕДЕНИЕ

Главная задача обучения физике – формирование научного (естественно-научного) мировоззрения. По мере его формирования приходит понимание, что представляет собой метод научного познания. Различают эмпирический и теоретический уровни познания (исследования). Каждый уровень характеризуется определенной логикой и использует как общие, так и специфические для данного уровня познания методы. На уровне эмпирического познания происходит накопление научных фактов, затем для их объяснения выдвигаются гипотезы, которые проверяют в эксперименте. Объяснение причин наблюдаемых явлений дает теория.

Основные способы эмпирического научного познания – это наблюдение и эксперимент.

Наблюдение – это целенаправленный процесс восприятия объектов действительности с целью выявления их существенных свойств. Наблюдение выполняют в естественных условиях, не вмешиваясь в ход естественного процесса. Так наблюдают смену фаз Луны, полярные сияния, колебания стрелки компаса в магнитном поле Земли и т.д. Этот метод используют во всех естественных науках: в биологии (рост и развитие растений и животных), в химии (химические процессы в природе), в астрономии (движение планет, звезд и пр.), в геологии (землетрясения, цунами, тайфуны, извержения вулканов). Наблюдения могут проводиться не только в природных условиях, но и в специально созданных. Могут быть непосредственными (при помощи органов чувств – зрение, слух, обоняние, осязание и т.д.) и опосредованными (с использованием приборов).

При проведении наблюдений структура деятельности исследователя следующая: определение цели наблюдения, составление плана наблюдения, определение способа фиксации результатов, которыми являются научные факты, они и составляют эмпирический базис науки.

Эксперимент – это метод познания, который используется для исследования явлений в специально созданных для этого условиях. Эксперимент отличается от наблюдения вмешательством в изучаемый процесс или воздействием на него. Эксперимент может быть исследовательским или проверочным, в зависимости от цели проведения может отличаться его роль в становлении научного знания.

Цель исследовательского эксперимента – установление свойств объектов, зависимостей между величинами. Например, определение зависимости силы тока от напряжения и сопротивления цепи (закон Ома), зависимости периода колебаний пружинного маятника от массы, математического – от длины нити, физического – от точки подвеса относительно центра масс.

Среди физических экспериментов особо выделяют фундаментальные эксперименты, благодаря которым появились физические теории, объясняющие новый класс физических явлений. Опыт Х. Эрстеда по взаимодействию проводника с током и магнитной стрелки, опыты М. Фарадея по электромагнитной индукции послужили эмпирическим базисом электродинамики как физической теории. Опыты Г. Герца и А.Г. Столетова по обнаружению фотоэффекта и установлению его закономерностей, опыты Г. Гейгера, Э. Марсдена и Э. Резерфорда по рассеянию альфа-частиц, эксперименты по установлению закона излучения абсолютно черного тела составили базис квантовой физики. Наблюдение и эксперимент являются источником наших знаний об окружающем мире. Исследования побуждают найти закономерности и связи между величинами, объяснить причину наблюдаемого явления, выдвинуть гипотезу (предположение о природе явления, причинах или законах, которым оно подчиняется). Для подтверждения гипотезы проводят проверочный эксперимент, в ходе которого она может быть подтверждена или опровергнута. Эксперимент в этом случае является критерием истинности полученных знаний.

Изучение физических явлений идет от простого наблюдения к постановке целенаправленных опытов, позволяющих получить не только качественное представление о предметах, явлениях и о процессах, происходящих в природе, но и охарактеризовать их количественно. При постановке опытов возникает необходимость проводить различные измерения, а значит, нужны специальные приборы и устройства.

Физический эксперимент имеет большое значение в учебной деятельности. Его используют для того, чтобы продемонстрировать какое-либо физическое явление. Но особенность в том, что его можно проводить неоднократно, изменять условия протекания, глубоко и всесторонне изучить физическое явление, убедиться в правильности и объективности физических законов. Профессиональная деятельность учителя физики неразрывно связана с физическим экспериментом (лабораторным, демонстрационным, компьютерным). Поэтому он должен знать устройство и принцип действия важнейших физических, физико-технических, бытовых и учебно-физических приборов и установок, уметь планировать и осуществлять учебный и научный эксперименты, организовывать экспериментальную и исследовательскую деятельность; оценивать результаты эксперимента, готовить отчетные материалы о проведенной исследовательской работе, в т.ч. с использованием ИКТ. Эти знания и умения будущий учитель физики приобретает на лабораторных занятиях по курсу общей и экспериментальной физики.

Для того чтобы научиться самостоятельно проектировать и проводить эксперимент, необходимо владеть методологией и методами физического эксперимента в области физики; грамотно использовать физический научный язык; представлять физическую информацию разными способами (в вербальной, знаковой, аналитической, математической, графической, схематической, образно-алгоритмической формах) для того, чтобы достичь целей эксперимента.

В основе методологии проведения физического эксперимента лежит определенная структура деятельности экспериментатора (представлена на рис. 1а) и в соответствие ей определена единая схема методического сопровождения лабораторных работ по физике (рис. 1б). Выполняя задания в той же последовательности, в которой они представлены в методическом руководстве к лабораторным работам, студенты проходят все этапы, связанные с проведением эксперимента.

а) б)

Рис. 1. Схема соответствия структуры методического руководства к лабораторной работе (б) и структуры деятельности при проведении эксперимента (а)

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМА ПО ОБЩЕЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКЕ

В ходе лабораторного практикума студенты выполняют лабораторные работы, на каждую в учебном плане отведено 4 часа. Выполнение лабораторной работы включает четыре этапа:

1. Подготовка к лабораторной работе.
2. Получение допуска (проверка знаний по теории, по методике проведения измерений, по обработке данных, полученных при измерениях).
3. Выполнение измерений в лаборатории.
4. Оформление отчёта по установленной форме и защита работы.

Подготовка к допуску и оформление отчёта выполняются в часы самостоятельной работы, другие два пункта – на занятии. Одно из условий получения допуска – наличие письменных ответов на контрольные вопросы по своей лабораторной работе. Для подготовки нужно использовать не только описание работы, но и конспекты лекций, учебные пособия, справочные материалы. Условием успешного выполнения работы на занятии является тщательная подготовка к ней.

Подготовка к лабораторной работе

При подготовке к лабораторной работе студент должен:

1. Определить цель работы.
2. Изучить теоретический материал, ответить на вопросы и решить задачи.
3. Изучить устройство, принцип действия и правила эксплуатации измерительных приборов и экспериментальной установки.
4. Ознакомиться с методом измерения или самостоятельно разработать его, сделать вывод рабочей формулы или теоретической зависимости, которую необходимо в соответствии с целью работы, проверить.
5. На основании рабочей формулы, теоретической зависимости или справочных материалов, сформулировать гипотезу эксперимента.
6. Спланировать эксперимент. Для этого необходимо:

а) определить величины, которые надо измерить непосредственно (прямые измерения), определить условия измерений;

б) определить, какие величины необходимо рассчитать косвенно, по каким формулам;

в) составить перечень приборов и оборудования;

г) наметить порядок проведения измерений и способ представления результатов измерения.

7. Подготовить бланк отчета по лабораторной работе, включив в него:

а) тему и цель работы;

б) схему и краткое описание экспериментальной установки;

в) перечень приборов и оборудования;

г) теоретическое обоснование для проведения эксперимента;

д) формулы для расчета погрешностей;

е) порядок проведения измерений;

ж) таблицу для записи результатов измерений и расчетов.

В тетради для лабораторных работ студенты делают все записи, связанные с планированием и выполнением эксперимента. Все вопросы, возникшие у студентов при подготовке проведения эксперимента, нужно обсудить при получении допуска к лабораторной работе.

Что должен сделать студент на занятии в лаборатории

1. Получить допуск к лабораторной работе в индивидуальной беседе с преподавателем.

2. Подготовить экспериментальную установку к работе, подобрать необходимое оборудование.

3. Провести необходимые измерения, записать результаты измерений в таблицы, произвести расчеты косвенных величин.

4. Оценить точность результатов измерений.

5. Представить результаты измерений (при необходимости) в виде графика на миллиметровой бумаге, проверить достоверность результатов измерений.

6. Проанализировать результаты измерений, сделать выводы.
7. Оформить отчет по лабораторной работе.
8. Защитить работу у преподавателя.

Отчет студента по лабораторной работе должен содержать

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Перечень оборудования;
4. Схему экспериментальной установки;
5. Теоретическое обоснование эксперимента – описание метода измерения;
6. Формулировку гипотезы эксперимента;
7. Таблицу результатов измерений;
8. Расчеты по результатам измерений, оценку погрешности;
9. Окончательную запись результатов;
10. Графическое представление результатов измерений (при необходимости);
11. Выводы.

ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Виды измерений

Измерением какой-либо величины называется операция, в результате которой мы узнаем, во сколько раз измеряемая величина больше (или меньше) соответствующей величины, принятой за эталон (единицу измерения). Все измерения можно разбить на два типа: прямые и косвенные.

Прямые измерения – это такие измерения, при которых измеряется непосредственно интересующая нас физическая величина (масса, длина, интервалы времени, изменение температуры, сила тока, напряжение и т.д.).

Косвенные измерения – это такие измерения, при которых интересующая нас величина определяется (вычисляется) из результатов прямых измерений других величин, связанных с ней определённой функциональной зависимостью. Например, определение скорости равномерного движения по измерениям пройденного пути промежутка времени, измерение плотности тела по измерениям массы и объёма тела, сопротивление проводника по значениям силы тока и напряжения и т.д.

Важно понимать, что невозможно получить истинное значение измеряемой величины, результат измерения всегда содержит какую-то ошибку (погрешность). Объясняется это двумя основными причинами: ограничения приборной точности измерения и особенностями самих измеряемых объектов. Поэтому, чтобы указать, насколько полученный результат близок к истинному значению, вместе с полученным результатом указывают ошибку измерения.

Например, мы измерили длину аудитории и написали, что

$$L = (8{,}25 \pm 0{,}02)\ м \qquad (1)$$

Это означает, что размер длины аудитории лежит в пределах от 8,23 м до 8,27 м. Но на самом деле это равенство (1) имеет вероятностный смысл (точность используемой для измерения линейки, ровность стен по вертикали и горизонтали и т.д.). Более того, мы не можем с полной уверенностью сказать, что величина лежит в указанных пределах, имеется лишь некоторая вероятность этого, поэтому равенство (1) нужно дополнить еще указанием вероятности, с которой это соотношение имеет смысл (ниже мы сформулируем это утверждение точнее).

Для определения объема аудитории необходимо провести прямые измерения ее длины, высоты и ширины. Каждое измерение аудитории может быть произведено с определенной точностью, все ошибки прямых измерений повлияют на точность расчетов объема аудитории, т.е. на точность косвенного измерения.

Классификация ошибок

Все ошибки измерения делят на три класса: промахи (грубые ошибки), систематические и случайные ошибки.

ПРОМАХ вызван нарушением условий измерения при отдельных наблюдениях. Это ошибка, связанная с толчком или поломкой прибора, грубым просчётом экспериментатора, непредвиденным вмешательством (например, скачок напряжения в сети, затруднение свободного перемещения из-за трения) и т.д. Грубая ошибка появляется обычно не более чем в одном-двух измерениях и резко отличается по величине от прочих ошибок. Наличие промаха может сильно исказить результат, содержащий промах. Правильнее всего установить причину промаха и устранить его в процессе измерения. Если в процессе измерения промах не был исключён, то это следует сделать при обработке результатов измерений. Используя специальные критерии, нужно объективно выделить в каждой серии наблюдений грубую ошибку, если она имеется. Обычно результаты промахов не берут в расчет.

СИСТЕМАТИЧЕСКОЙ ОШИБКОЙ называют составляющую погрешности измерений, которая остается постоянной и закономерно изменяется при повторных измерениях одной и той же величины. Систематические ошибки возникают, если не учитывать, например, тепловое расширение при измерениях объёма жидкости или газа, производимых при медленно меняющейся температуре; если при измерении массы не принять во внимание действие выталкивающей силы воздуха на взвешиваемое тело и на разновесы и т.д. Систематические ошибки наблюдаются, если шкала линейки нанесена неточно (неравномерно); капилляр термометра в разных участках имеет разное сечение; в ненагруженном состоянии стрелка динамометра стоит не на нуле и т.д.

Как видно из примеров, систематическая ошибка вызывается определёнными причинами, величина её остается постоянной (смещение нуля шкалы прибора, неравноплечность весов), либо изменяется по определённому (иногда довольно сложному) закону (неравномерность шкалы, неравномерность сечения капилляра термометра и т.д.).

Можно сказать, что систематическая ошибка – это смягчённое выражение, заменяющее слова «ошибка экспериментатора».

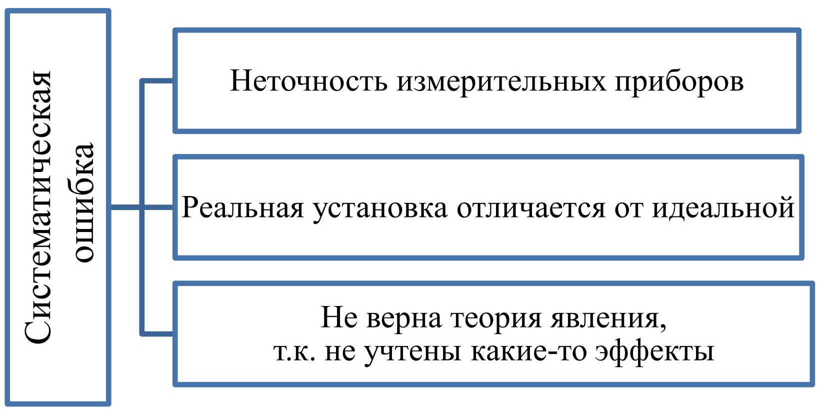


Рис. 2. Основные источники систематических ошибок измерений

В случае неточности измерительных приборов нужно произвести калибровку (градуировку) или ввести поправку. В двух других случаях готового рецепта не существует. Чем лучше вы знаете физику, чем больше у вас опыта, тем больше вероятность, что вы обнаружите подобные эффекты, а значит, и устраните их. Общих правил, рецептов для выявления и устранения систематических ошибок нет, но некоторую классификацию можно провести. Выделим четыре типа систематических ошибок.

1. Систематические ошибки, природа которых вам известна, а величина может быть найдена. Следовательно, такая ошибка может быть исключена введением поправок.

Часто максимальная абсолютная ошибка, даваемая данным прибором, указывается с помощью класса точности прибора, который изображается на шкале прибора соответствующим числом, чаще всего взятым в кружок.

Число, обозначающее класс точности, показывает максимальную абсолютную ошибку прибора, выраженную в процентах от наибольшего значения измеряемой величины на верхнем пределе шкалы, (иначе говоря, максимальная относительная ошибка на пределе шкалы измерения).

Например, в измерениях использован вольтметр, имеющий шкалу от 0 до 250 В, класс точности его – 1. Это значит, что максимальная абсолютная ошибка, которая может быть допущена при измерении этим вольтметром, будет не больше 1% от наибольшего значения напряжения, которое можно измерить на этой шкале прибора, иначе говоря:

$$\delta = \pm 0{,}01 \cdot 250\ В = \pm 2{,}5\ В\ .$$

Класс точности электроизмерительных приборов определяет максимальную погрешность, величина которой не меняется при переходе от начала к концу шкалы. Относительная ошибка при этом резко меняется, потому приборы обеспечивают хорошую точность при отклонении стрелки почти на всю шкалу и не дают её при измерениях в начале шкалы. Отсюда следует рекомендация: *выбрать прибор* (или шкалу многопредельного прибора) так, *чтобы стрелка прибора при измерениях заходила за середину шкалы.*

Если класс точности прибора не указан и нет паспортных данных, то в качестве максимальной абсолютной ошибки прибора берут половину цены наименьшего деления шкалы прибора.

Несколько слов о точности линеек. Металлические линейки очень точны: миллиметровые деления наносятся с погрешностью не более ± 0,05 мм, а сантиметровые не хуже, чем с точностью 0,1 мм. Погрешность измерений, производимых с точностью таких линеек, практически равна погрешности отсчёта на глаз

($\leq$0,5 мм). Деревянными и пластиковыми линейками лучше не пользоваться, их погрешности могут оказаться неожиданно большими.

Исправный микрометр обеспечивает точность 0,01 мм, а погрешность измерений штангенциркулем определяется точностью, с которой может быть сделан отсчет, т.е. точностью нониуса (обычно 0,1 мм или 0,05 мм).

2. Систематические ошибки, обусловленные свойствами измеряемого объекта. Эти ошибки часто могут быть сведены к случайным.

Пример. Определяется упругость некоторого материала. Если для такого измерения взят образец, имеющий какой-то дефект (скрытую полость, неоднородность), то в определении коэффициента будет допущена ошибка. Повторение измерений дает такое же значение, т.е. допущена некоторая систематическая ошибка. Но есть возможность провести измерения на других участках материала и выявить дефектный образец.

3. Систематические ошибки, о существовании которых ничего не известно.

Пример. Определяем плотность какого-либо металла. Вначале находим объем и массу образца. Внутри образца содержится пустота, о которой мы ничего не знаем. В определении плотности будет допущена ошибка, которая повторится при любом числе измерений. Приведенный пример прост, источник погрешности и её величину можно определить без больших затруднений.

Ошибки такого типа можно выявить с помощью дополнительных исследований путём проведения измерений совсем другим методом и в других условиях.

СЛУЧАЙНОЙ называют составляющую погрешности измерений, изменяющуюся случайным образом при повторных измерениях одной и той же величины.

При проведении с одинаковой тщательностью и в одинаковых условиях повторных измерений одной и той же постоянной неизменяющейся величины мы получаем результаты измерений – некоторые из них отличаются друг от друга, а некоторые совпадают. Такие расхождения в результатах измерений говорят о наличии в них случайных составляющих погрешности.

Случайная погрешность возникает при одновременном воздействии многих источников, каждый из которых сам по себе оказывает незаметное влияние на результат измерения, но суммарное воздействие всех источников может оказаться достаточно сильным.

Случайная ошибка может принимать различные по абсолютной величине значения, предсказать которые для данного акта измерения невозможно. Эта ошибка в равной степени может быть как положительной, так и отрицательной. Случайные ошибки всегда присутствуют в эксперименте. При отсутствии систематических ошибок они служат причиной разброса повторных измерений относительно истинного значения.

Если, кроме того, имеется и систематическая ошибка, то результаты измерений будут разбросаны относительно не истинного, а смещенного значения.

Например, если при измерении времени движения, включив секундомер, несколько запаздываем выключить его, то это приведёт к систематической ошибке. Случайные погрешности могут быть вызваны ошибкой параллакса при отсчёте делений шкалы прибора, сотрясении фундамента здания, влиянием незначительного движения воздуха и т.п.

Хотя исключить случайные погрешности отдельных измерений невозможно, математическая теория случайных явлений позволяет уменьшить влияние этих погрешностей на окончательный результат измерений. Для этого необходимо произвести не одно, а несколько измерений, причём большее количество измерений помогает выявить значительные отклонения. Допустим, что при помощи секундомера измеряют период колебаний маятника, причём измерение многократно повторяют. Погрешности пуска и остановки секундомера, ошибка в величине отсчёта, небольшая неравномерность движения маятника – всё это вызывает разброс результатов повторных измерений и поэтому может быть отнесено к категории случайных ошибок. Если других ошибок нет, то одни результаты окажутся несколько завышенными, а другие несколько заниженными, отклонения в большую и меньшую сторону равновероятны. Но если, помимо этого, часы ещё и отстают, то все результаты будут занижены. Это уже систематическая ошибка.

Если случайная погрешность, полученная из данных измерений, окажется значительно меньше погрешности, определяемой точностью прибора, то, очевидно, что нет смысла пытаться ещё уменьшить величину случайной погрешности, в данном случае измерения определяются точностью прибора. Если же случайная погрешность больше приборной (систематической), то измерение следует провести несколько раз, чтобы уменьшить значение погрешности для данной серии измерений и сделать эту погрешность меньше или одного порядка с погрешностью прибора.

Функция Гаусса

Для уменьшения влияния случайных ошибок производят измерение данной величины несколько раз. Предположим, что мы измеряем некоторую величину x. В результате проведённых измерений мы получили n значений величины x:

$$x_1, x_2, x_3, \ldots, x_n \quad . \qquad (2)$$

Этот ряд значений величины x получил название выборки. Имея такую выборку, можно дать оценку результата измерений. Величину, которая будет являться такой оценкой, называют средним значением и обозначают $\overline{x}$.

При большом числе измерений, то есть при большей выборке, задача оценки результата может быть решена с помощью теории вероятностей и математической статистики. В большинстве случаев случайные ошибки подчиняются нормальному закону распределения, установленному Гауссом. Нормальный закон распределения ошибок выражается формулой

$$y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(\Delta x)^2}{2\sigma^2}} , \qquad (3)$$

где Δx – отклонение от величины истинного значения, σ – дисперсия или истинная среднеквадратичная ошибка, σ^2 – квадратичная дисперсия, величина которой характеризует разброс случайных величин.

Как видно из формулы (3), функция y имеет максимальное значение при $x = 0$, кроме того, она является чётной. На рис. 3 показан график этой функции. Смысл функции заключается в том, что площадь фигуры, заключённой между кривой, осью Δx и двумя ординатами из точек Δx_1 и Δx_2 (заштрихованная площадь на рис. 3) численно равна вероятности, с которой любой отсчёт попадёт в интервал $(\Delta x_1, \Delta x_2)$. Графически функция Гаусса представляет собой симметричную колоколообразную кривую, площадь под которой равна единице, а ширина на середине высоты пропорциональна дисперсии. Так как величины σ и $x_и$ обычно заранее неизвестны, то вместо них используют эмпирическую дисперсию и среднее значение $\bar{x}$.

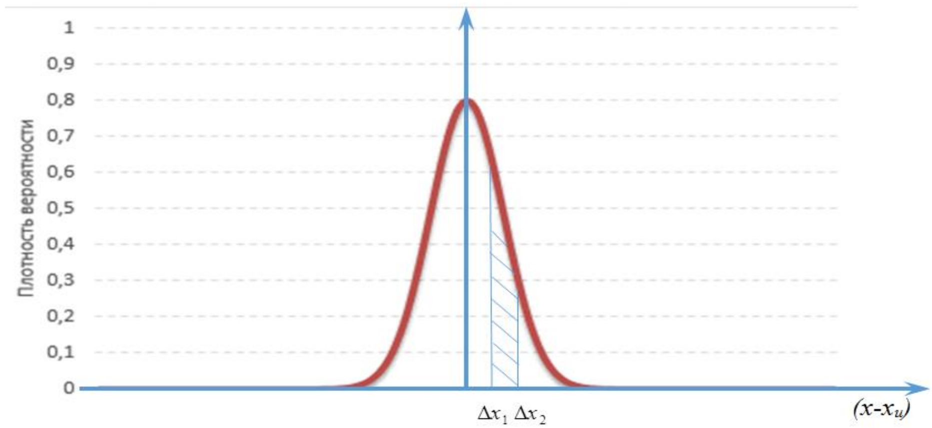


Рис. 3. Графическое представление функции Гаусса

Поскольку кривая распределена симметрично относительно оси ординат, можно утверждать, что равные по величине, но противоположные по знаку ошибки равновероятны. А это дает возможность в качестве оценки результатов измерений взять среднее значение всех элементов выборки

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n}. \tag{4}$$

Если в одних и тех же условиях проделано n измерений, то наиболее вероятным значением измеряемой величины будет её среднее арифметическое значение. Величина $\bar{x}$ стремится к истинному значению $x_и$ измеряемой величины при $n \to \infty$.

Задание 1

Функцию Гаусса можно получить экспериментально.

1. Возьмите чистый лист миллиметровой бумаги, проведите с помощью линейки вертикальную прямую приблизительно посередине листа. С расстояния примерно 20 см быстрыми движениями при помощи острозаточенного простого карандаша нанесите 50 точек на листе, каждый раз стараясь попасть в прямую линию. Частота нанесения – одна точка в секунду, старайтесь, чтобы точки не сливались.

2. Подсчитайте количество точек, находящихся справа на расстоянии 0–1 мм, 1–2 мм, 2–3 мм, 3–4 мм и т.д., затем слева. Если точка попала на границу, считайте, что она принадлежит интервалу, который расположен ближе к исходной прямой.

3. Занесите данные в таблицу, постройте график: по оси абсцисс отложите границы интервалов, в которых подсчитывали количество точек, по вертикали количество точек, которые попали в этот диапазон.

4. Соедините получившиеся точки графика плавной линией. Если вы сидели ровно, сделали все аккуратно, то у вас должна получиться колоколообразная кривая распределения. Оцените свою меткость и объясните отклонения от идеальной формы «колокола» (если есть).

Алгоритм вычисления эмпирической дисперсии прямых измерений физической величины

1. Пусть проведено n-кратное измерение физической величины $\boldsymbol{x}$, все значения получены с точностью не большей, чем приборная погрешность. Это должно быть отражено в записи значений: если измерения проведены при помощи миллиметровой линейки, то записывают, например, 20 мм, если при помощи микрометра (приборная погрешность 0,01 мм), то 20,00 мм, последняя цифра показывает точность измерения.

2. Так как истинное значение неизвестно, то определяем среднее арифметическое значение величины по формуле $\bar{x} = (x_1 + x_2 + x_3 + \cdots + x_n)/n$ или

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_i}{n}, \qquad (5)$$

где n – число измерений, которое округляем до приборной погрешности.

3. Найдем отклонение от среднего значения для каждого результата измерения $(\bar{x} - x_i)$. Так как отклонения в большую и меньшую сторону равновероятны, то значения разностей могут быть как положительные, так и отрицательные.

4. Найдем квадраты всех разностей $(\bar{x} - x_i)^2$, их должно быть n (как и число измерений), они все больше нуля и их размерность равна квадрату размерности x.

5. Рассчитаем эмпирическую квадратичную дисперсию по формуле

$$S_x{}^2 = \sum_{i=1}^{n}(\bar{x} - x_i)^2 \Big/ (n-1). \qquad (6)$$

6. Эмпирическая дисперсия измерений величины x имеет ту же размерность, что и сама величина и равна

$$S_x = \sqrt{S_x{}^2} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(\bar{x} - x_i)^2}{(n-1)}}. \qquad (7)$$

Проанализируйте полученное значение: если S_x больше приборной погрешности, то значение эмпирической дисперсии округлите до порядка приборной погрешности. Если эмпирическая дисперсия меньше, то для дальнейших расчетов необходимо применять приборную погрешность.

7. На практике важно знать, какую долю составляет эмпирическая дисперсия S_x от величины x. Точность в 1 метр может устроить при измерении расстояния между населенными пунктами, но совсем не удовлетворительна при измерении размеров аудитории. Объективной характеристикой точности измерений является относительная эмпирическая дисперсия

$$\delta_x = \frac{S_x \cdot 100\%}{\bar{x}}. \qquad (8)$$

Относительная эмпирическая дисперсия, безразмерная или выраженная в процентах величина, используется для оценки погрешности косвенных измерений.

Погрешность косвенных измерений

Многие физические величины, например, плотность, объем, сопротивление, можно измерить напрямую, а можно рассчитать косвенно с помощью других величин (плотность рассчитать, зная массу и объем; объем, измерив геометрические размеры; сопротивление – с помощью силы тока и напряжения). Определить ускорение свободного падения, длину волны, показатель преломления и т.д. возможно только косвенно. Оценить точность косвенных измерений позволяют методы математической статистики в теории случайных погрешностей.

В основе лежит понимание того, что каждая напрямую измеренная величина, которую используют при косвенных измерениях, вносит вклад в погрешность измерения.

Допустим, используют для расчета физической величины формулу (она взята произвольно, не ищите физический смысл)

$$Y = \frac{4\pi A^2 + B}{C^3 + D^5}, \qquad (9)$$

где A, B, C, D – величины, которые определены прямыми измерениями, соответственно с эмпирической дисперсией $\delta_A, \delta_B, \delta_C, \delta_D$, при этом, коэффициент 4π не измеряют и свой вклад в погрешность эти числа не вносят. Относительная эмпирическая дисперсия косвенного измерения величины Y определяется следующим соотношением:

$$\delta_Y = \sqrt{2{\delta_A}^2 + {\delta_B}^2 + 3{\delta_C}^2 + 5{\delta_D}^2}. \qquad (10)$$

Так как складываются квадраты относительных эмпирических дисперсий, то максимальный вклад в погрешность вносят те прямые измерения, которые выполнены с наибольшей погрешностью. Обратите внимание, если физическая величина, определяемая прямыми измерениями, стоит в некоторой степени, то ее вклад в общую погрешность увеличивается, квадрат относительной эмпирической дисперсии умножают на число, равное показателю степени.

Среднее значение величины Y вычисляют, используя средние значения прямых измерений

$$\bar{Y} = \frac{4\pi\bar{A}^2+\bar{B}}{\bar{C}^3+\bar{D}^5}. \qquad (11)$$

Величину эмпирической дисперсии косвенного измерения вычисляем по формуле

$$S_Y = \delta_Y \cdot \bar{Y}/_{100\%}. \qquad (12)$$

Правила округления при косвенных измерениях:

1. Округление S_Y производится до первой значащей цифры.

2. Значение $\bar{Y}$ округляют до разряда, соответствующего первой значащей цифре S_Y.

Например, $243{,}871 \pm 0{,}026 \approx 243{,}87 \pm 0{,}03$

$243{,}871 \pm 2{,}6 \approx 244 \pm 3$

$1053 \pm 47 \approx 1050 \pm 50$.

Результаты физических экспериментов записывают только значащими цифрами. Запятую ставят сразу после отличной от нуля цифры, а число умножают на десять в соответствующей степени. Нули, стоящие в начале или конце числа, как правило, не записывают. Например, числа 0,00435 и 234000 записывают так: $4{,}35 \cdot 10^{-3}$ и $2{,}34 \cdot 10^{5}$. Подобная запись упрощает вычисления, особенно в случае формул, удобных для логарифмирования.

Доверительная вероятность и доверительный интервал

Точное истинное значение физической величины определить в результате даже многократных измерений невозможно. Но методы математической статистики позволяют определить интервал значений физической величины, внутри которого находится ее истинное значение. Величина этого интервала определяется двумя факторами: величиной эмпирической дисперсии и выбираемой экспериментатором вероятностью того события, что истинное значение физической величины лежит именно внутри этого интервала. Эта вероятность называется доверительной, а интервал значений физической величины называется доверительным интервалом.

В 1908 году Стьюдент показал, что статистический подход справедлив не только в случае, когда одна и та же величина измерялась 30–50 раз, но и при малом числе измерений. Распределение Стьюдента при числе измерений $n \to \infty$ переходит в распределение Гаусса, а при малом числе отличается от него.

Для расчёта абсолютной ошибки при малом количестве измерений вводится специальный коэффициент Стьюдента, зависящий от доверительной вероятности (надёжности) P и числа измерений. Опуская теоретические обоснования его введения, заметим, что

$$\Delta = \frac{k \cdot S_x}{\sqrt{n}}, \tag{13}$$

где Δ – доверительный интервал для данной доверительной вероятности P,

S_x – эмпирическая дисперсия измерений величины x,

k – коэффициент Стьюдента (приведены в таблице 1).

Из сказанного следует:

1. Величина среднеквадратичной ошибки позволяет вычислить вероятность попадания истинного значения измеряемой величины в любой интервал вблизи среднего арифметического.

2. При $n \to \infty$ эмпирическая дисперсия измерений величины x уменьшается ($S_{\bar{x}} \to 0$), т.е. интервал, в котором с вероятностью P находится истинное значение, стремится к нулю с увеличением числа измерений. Казалось бы, увеличивая n, можно получить результат с любой степенью точности. Однако точность существенно увеличивается лишь до тех пор, пока случайная ошибка не станет сравнимой с систематической. Дальнейшее увеличение числа измерений нецелесообразно, т.к. конечная точность результата будет зависеть только от систематической ошибки. Зная величину систематической ошибки, нетрудно задаться допустимой величиной случайной ошибки, взяв её, например, равной 10% от систематической.

Таблица 1

Коэффициенты Стьюдента

n	0,6	0,8	0,95	0,99	0,999
2	1,376	3,078	12,706	63,657	636,61
3	1,061	1,886	4,303	9,925	31,598
4	0,978	1,638	3,182	5,841	12,941
5	0,941	1,533	2,776	4,604	8,610
6	0,920	1,476	2,571	4,032	6,859
7	0,906	1,440	2,447	3,707	5,959
8	0,896	1,415	2,365	3,499	5,405
9	0,889	1,397	2,306	3,355	5,041
10	0,883	1,383	2,262	3,250	4,781
11	0,879	1,372	2,228	3,169	4,587
12	0,876	1,363	2,201	3,106	4,437
13	0,873	1,356	2,179	3,055	4,318
14	0,870	1,350	2,160	3,012	4,221
15	0,868	1,345	2,145	2,977	4,140
16	0,866	1,341	2,131	2,947	4,073
17	0,865	1,337	2,120	2,921	4,015
18	0,863	1,333	2,110	2,898	3,965
19	0,862	1,330	2,101	2,878	3,922
20	0,861	1,328	2,093	2,861	3,883
21	0,860	1,325	2,086	2,845	3,850
22	0,859	1,323	2,080	2,831	3,819
23	0,858	1,321	2,074	2,819	3,792
24	0,858	1,319	2,069	2,807	3,767
25	0,857	1,318	2,064	2,797	3,745
26	0,856	1,316	2,060	2,787	3,725
27	0,856	1,315	2,056	2,779	3,707
28	0,855	1,314	2,052	2,771	3,690
29	0,855	1,313	2,048	2,763	3,674
30	0,854	1,311	2,045	2,756	3,659
31	0,854	1,310	2,042	2,750	3,646
40	0,851	1,303	2,021	2,704	3,551
60	0,848	1,296	2,000	2,660	3,460
120	0,845	1,289	1,980	2,617	3,373
∞	0,842	1,282	1,960	2,576	3,291

Лабораторная работа 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ТЕЛА ПРАВИЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

Цель работы:

1. Изучить устройство штангенциркуля, микрометра, технических весов.

2. Научиться измерять линейные размеры тел штангенциркулем и микрометром.

3. Измерить плотность твердого тела и определить, из какого вещества оно сделано.

Используя приложения 1–5, ответьте на вопросы к допуску:

1. Что называется нониусом? Каково его назначение? Как определить точность нониуса? Как измерить длину предмета с помощью нониуса? Ответы сопровождайте рисунками.

2. Каково назначение штангенциркуля? Назовите его основные части. Как пользоваться штангенциркулем при измерении внешних и внутренних размеров тел?

3. Каково назначение микрометра? Назовите основные части его. Как определить цену деления микрометра? Как пользоваться микрометром при измерении линейных размеров тел?

4. Каково назначение технических весов? Как подготовить весы к работе? Как определить нулевую точку и цену деления технических весов?

5. Каковы правила взвешивания на технических весах? Из каких гирь состоит разновес? В какой последовательности нужно класть гири на правую чашку весов, чтобы скорее добиться равновесия чашек?

6. Что называют плотностью вещества? Дайте определение, назовите единицы измерения, запишите формулу.

7. Решите задачи:

а) Плотность железа $7{,}8 \cdot 10^3\ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. Что это означает?

б) Металлический шарик диаметром 0,5 см, имеет массу 0,74 г. Из какого металла сделан шарик?

в) Шаг винта микрометра 0,5 мм. Какова цена деления шкалы барабана микрометра, если она содержит 50 делений; 25 делений?

8. Пользуясь справочником, выпишите в тетрадь плотность следующих веществ: воды, дерева, пробки, стекла, алюминия, свинца, железа, ртути, золота, осмия. Запишите пять значений плотности газов.

Задания при планировании эксперимента

1. Так как плотность твердого тела нельзя непосредственно измерить, выведите формулу для косвенного определения плотности какого-либо из следующих тел (по указанию преподавателя):

а) параллелепипеда;

б) шара;

в) конуса;

г) цилиндра.

2. Чтобы наметить порядок выполнения работы, ответьте на вопросы:

а) какие прямые измерения и каким образом нужно провести, чтобы определить плотность данного тела?

б) какие случайные и систематические погрешности могут возникнуть при проведении измерений и как их можно учесть?

3. Составьте список приборов и оборудования, необходимых для выполнения работы.

4. Начертите таблицу для записи результатов измерений.

5. Выведите формулу для расчета относительной эмпирической дисперсии.

Задания при выполнении работы в лаборатории

1. Подберите приборы для работы, убедитесь в их исправности.

2. Запишите технические характеристики приборов.

3. Проведите необходимые прямые измерения. Результаты измерений запишите в таблицу.

4. Проведите вычисления.

5. Запишите результат измерения плотности тела в окончательном виде.

6. Определите, из какого вещества сделано тело.

Дополнительное задание

Определите плотность цилиндрической трубки.

Приложение 1

НОНИУС

Нониусом (линейным или круговым) называется специальная шкала, дополняющая обычный масштаб и позволяющая повысить точность измерений в 10–20 раз. Линейный нониус представляет собой небольшую линейку (рис. 4), скользящую вдоль основной шкалы, называемой масштабом.

Пусть число делений шкалы нониуса равно m, расстояние между соседними делениями нониуса x, а расстояние между соседними делениями основной шкалы y. Нониусы изготавливаются таким образом, что длина m делений нониуса равна длине (a_m – 1) делений основной шкалы.

Во всех случаях точность нониуса равна цене деления основной шкалы (масштаба), разделенной на число делений нониуса.

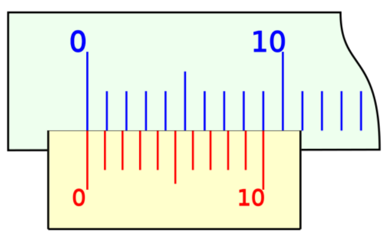


Рис. 4. Шкала основная и шкала нониуса

При измерении с помощью нониуса начало измеряемого отрезка совмещают с нулевым делением основной шкалы, тогда конец его располагается между k и k+1 делениями этой шкалы. Следовательно, длина измеряемого отрезка $l = ky + dl$, где dl − доля k-того деления, которая равна точности нониуса, умноженной на номер деления нониуса, совпадающего с некоторым делением масштаба.

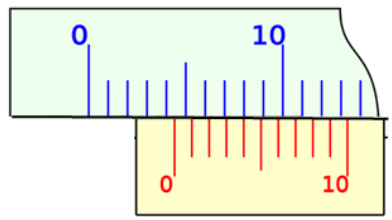


Рис. 5. Пример показаний штангенциркуля

По рисунку 5 определите измеряемый отрезок, если цена деления основной шкалы y = 1 мм, dl определите из рисунка.

Приложение 2

ШТАНГЕНЦИРКУЛЬ

Штангенциркуль служит для измерения линейных размеров тел. Он состоит из масштабной линейки 1, с одной стороны которой имеется неподвижная ножка 2. Ножка 3, имеющая нониус 4 и стержень 5, может перемещаться вдоль линейки 1 и закрепляться на ней зажимным винтом 6. Губки ножек 7 штангенциркуля служат для измерения внутренних размеров тел. Если ножки 2 и 3 соприкасаются, то нулевое деление линейки совпадает с нулевым делением нониуса.

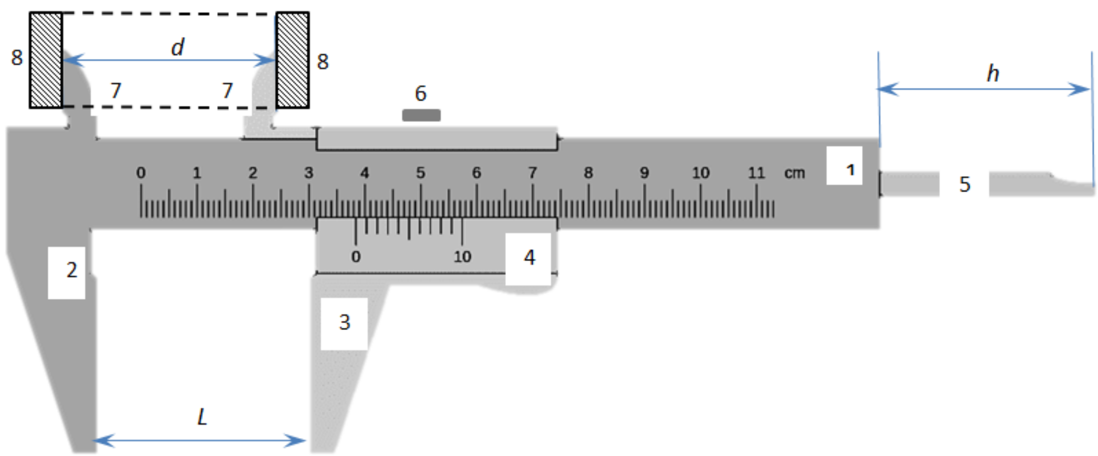


Рис. 6. Штангенциркуль

При измерении длины предмета L его помещают между ножками штангенциркуля, которые сдвигают до соприкосновения с предметом (без сильного нажима) и закрепляют винтом 6. При этом подвижная ножка, а следовательно и нуль нониуса, переместились на длину предмета L, которую можно вычислить по формуле:

$$L = ky + n\,Ax, \qquad (1)$$

где k – число делений масштабной линейки до нуля нониуса;

y – цена деления линейки;

n – номер деления нониуса, совпадающего с некоторым делением масштабной линейки;

Ax – точность нониуса.

При измерении внутренних размеров тел губки 7 вводят во внутреннюю часть его. Например, при измерении внутреннего диаметра d трубки 8 губки 7 разводят настолько, чтобы они прилегали к внутренним стенкам трубки.

При измерении углублений h стержень 5 вводят в углубление до соприкосновения с его дном. Три размера L, d, и h равны между собой. Следовательно, d и h можно вычислить по формуле (1).

Приложение 3

МИКРОМЕТР

В микрометрах, служащих для более точных измерений линейных размеров тел (диаметра проволоки, толщины тонких пластинок и т.д.), применяются микрометрические винты.

Микрометрический винт представляет собой стержень с точной винтовой нарезкой. Расстояние, на которое переместился винт за один оборот, называется шагом винта h. Микрометр для измерения внешних размеров тел (рис. 7) состоит из скобы 1 и микрометрического винта 3, который проходит через отверстие скобы с внутренней резьбой. Против микрометрического винта на скобе 1 имеется упор 2. На винте закреплен полый цилиндр 6 (барабан), на окружности которого имеется шкала, содержащая n делений. Вращение винта осуществляется головкой 5 до по-явления слабого треска, при этом барабан скользит по линейной шкале, нанесенной на полый цилиндр 7.

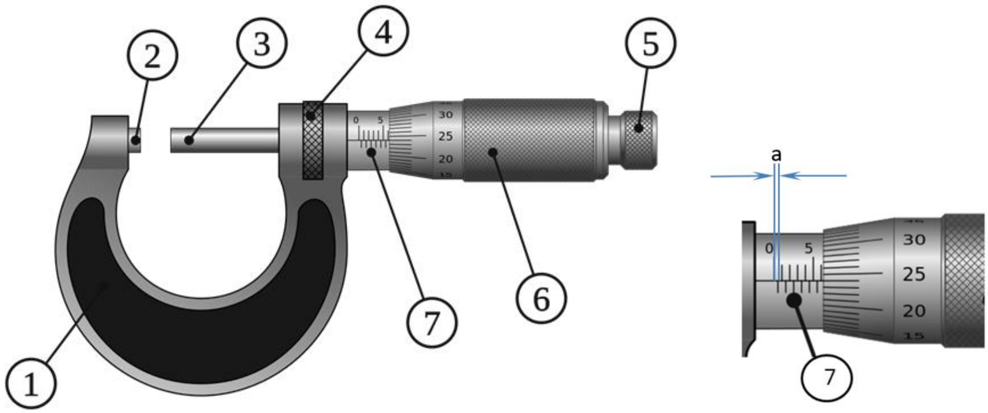


Рис. 7. Микрометр

Шкала 7 имеет верхние и нижние риски. Верхние риски сдвинуты относительно нижних на 0,5 мм, значит цена деления линейной шкалы а = 0,5 мм. За один оборот винта барабан передвигается на одно деление линейной шкалы, следовательно, шаг винта h = 0,5 мм, то есть a = h. Так как шкала барабана содержит n делений, то цена деления барабана

$$x = \frac{a}{n}.$$

Если микрометрический винт 3 соприкасается с упором 2, то нулевое деление шкалы барабана совпадает с горизонтальной риской линейной шкалы 7 и окружность барабана проходит через нулевое деление линейной шкалы.

При измерении микрометром предмет помещают между упором 2 и микрометрическим винтом 3 и вращают головку 5 до соприкосновения винта с предметом. В этом случае измеряемый размер можно вычислить по формуле:

$$l = ka + mx = ka + m\frac{a}{n},$$

где k – число целых делений линейной шкалы до барабана;

m – номер деления шкалы барабана, совпадающего с горизонтальной риской линейной шкалы;

x – цена деления шкалы барабана.

Если при соприкосновении винта с упором показания микрометра отличаются от нуля, то соответствующее показание нужно вычесть из всех измеряемых значений.

Примечание. При работе с микрометром следует иметь в виду, что винт с малым шагом превращает незначительные усилия руки, поворачивающий его, в большие силы, действующие на измеряемый объект и сам микрометр. Это приводит как к деформации предмета, так и к повреждению микрометра (срыву резьбы и несовпадению шкал при соприкосновении винта с упором). Чтобы уменьшить ошибку, связанную с сильным и неодинаковым нажатием измеряемых объектов, головка 5 винта 3 снабжена «трещоткой», позволяющей создавать небольшое, заданное ГОСТом, давление на измеряемый предмет.

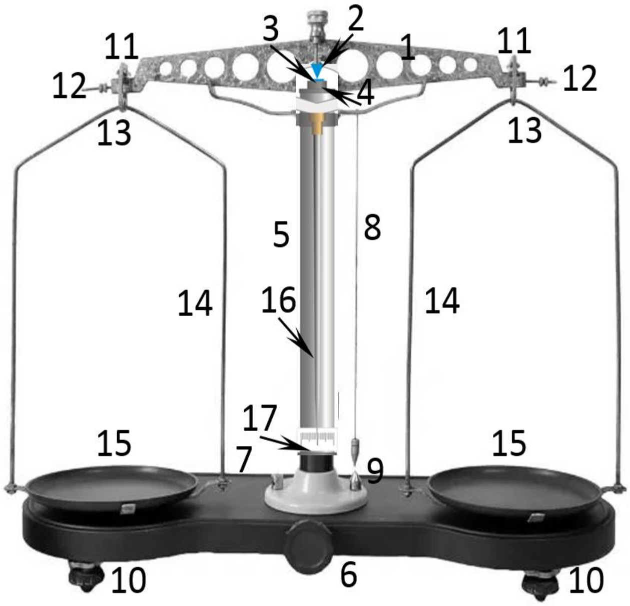
Приложение 4

ТЕХНИЧЕСКИЕ ВЕСЫ

Технические весы (рис. 8) служат для измерения массы тел с точностью до 10 г. Основной частью весов является равно плечное подвижное коромысло 1 с опорной призмой 2, которой оно опирается на подушку 3, укрепленную на верхнем конце стержня арретира 4. Стержень арретира располагается внутри колонки 5 и перемещается вертикально внутри нее с помощью ручки 6. Колонка крепится на доске подставки 7. Отвес 8 и указатель отвеса 9 определяют горизонтальное положение подставки. В горизонтальном положении весы можно установить с помощью винтов 10.

На концах коромысла имеются грузоподъемные призмы 11 и регуляторы равновесия 12. На призмы 11 подвешены серьги 13 с дужками 14 и находящимися на них съемными чашками 15. Положение коромысла регистрируется с помощью стрелки 16 и шкалы 17.

В нерабочем состоянии весы необходимо арретировать. Арретирование достигается поворотом ручки 6. При этом подушка 3 опускается и коромысло 1 ложится на колонку 4, а чашки 15 на подставку весов 7, и все призмы и подушка освобождаются от нагрузки. Технические весы снабжают набором гирь. Гири хранятся в специальном ящике, где каждая из них имеет свое гнездо. Работа на весах требует осторожности. Не следует двигать весы по столу, наклонять и без надобности переносить с места на место. Весы должны содержаться в чистоте. Удаление пыли с деталей весов следует производить мягкой тканью или волосяной кисточкой.



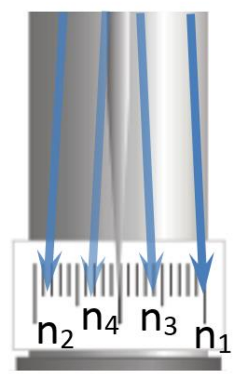


Рис. 8. Технические весы

При взвешивании на весах рекомендуется придерживаться следующего порядка:

1. С помощью винтов 10 установите весы горизонтально. При этом отвес 8 должен находиться над выступом 9, укрепленном на подвеске.

2. Освободите весы от арретира. В исправных весах коромысло 1, а значит и стрелка 16, начинает плавно качаться около положения равновесия, которое может не совпадать с нулевым делением шкалы 17.

3. Определите нулевую точку весов, то есть деление шкалы, которое соответствует положению равновесия. Положение равновесия нужно определить при качающемся коромысле весов. Это делается следующим образом. Если при первом отклонении стрелки вправо (рис. 8), она достигает деления шкалы n_1, а при первом отклонении влево – деления n_2, при втором отклонении вправо – n_3, а при втором отклонении влево n_4 и т.д., то нулевая точка весов может быть определена по формуле:

$$n_0 = \frac{1}{2}\left(\frac{n_1 + n_2}{2} + \frac{n_3 + n_4}{2}\right).$$

Если положение равновесия сильно смещено от середины шкалы, его можно исправить с помощью гаек 12 (рис. 8) или уравновесить чашки легкими бумажками. Нельзя использовать для уравновешивания чашек гири, они потребуются для взвешивания.

4. Цена деления шкалы весов a определяется массой перегрузка, вызывающей смещение стрелки весов на одно деление шкалы, и может быть определена по формуле:

$$a = \frac{m}{n_0^1 - n_0},$$

где n_0 – нулевая точка ненагруженных весов;

n_0^1 – нулевая точка весов, нагруженных массой m.

При определении цены деления весов следует пользоваться небольшими разновесками, не выводящими стрелку за пределы шкалы. Величину $c = \frac{1}{a}$ называют чувствительностью весов. Следовательно,

$$c = \frac{n_0^1 - n_0}{m}.$$

5. Взвесьте тело, положив его на левую чашку и уравновесив весы гирями. Если нулевая точка нагруженных весов n_0^1 совпадает с нулевой точкой ненагруженных весов n_0, то масса тела равна массе гирь m. В случае, когда $n_0^1 \neq n_0$, массу тела можно определить по формуле: $m_{тела} = m_{гирь} \pm a\ (n_0^1 - n_0)$. Если перевешивает тело, берут знак «+», если перевешивают гири, берут знак «–».

Приложение 5

ПРАВИЛА ВЗВЕШИВАНИЯ

1. Нельзя нагружать весы больше предельной нагрузки, которая указывается на самих весах.

2. Взвешиваемое тело кладется на левую чашку весов, а гири – на правую осторожно, чтобы не уронить их даже с небольшой высоты.

3. На чашки весов нельзя класть грязные, мокрые, горячие тела; наливать жидкости; насыпать без использования подкладки сыпучие вещества.

4. Нагружать весы и измерять нагрузку разрешается только при арретированных весах. Арретировать весы и освобождать коромысло от арретира нужно медленно, плавно, без толчков. При неумелом освобождении от арретира чашки весов и коромысло начинают совершать колебания. Успокоить весы лучше всего, слегка их арретируя в тот момент, когда стрелка проходит через положение равновесия (иначе коромысло получает толчки), и снова опуская арретир.

5. Брать разновески следует специальным пинцетом. До окончательного подбора разновесок не освобождать арретир полностью. При грубом несоответствии массы гирь массе разновесок неуравновешенность весов обнаруживается уже в самом начале опускания арретира.

6. Подбор разновесок проводится следующим образом. Сначала на правую чашку кладут разновеску, имеющую массу немного большую, чем масса взвешиваемого тела (подбирают на глаз). Если разновесок перетягивает чашку, его снимают и помещают в ящик на предназначенное ей место, а на правую чашку кладут следующую меньшую. Если чашка с гирями снова перетягивает, этот разновесок убирают, а на правую чашку кладут следующую меньшую и т.д., до тех пор, пока не будет достигнуто равновесие. При несоблюдении этого правила мелких разновесок может не хватить, и взвешивание придется начинать сначала.

7. Уравновесив тело, весы необходимо арретировать и подсчитать общую массу лежащих на правой чашке весов разновесок, а затем перенести их в ящик на предназначенное каждому разновеску место.

Нельзя оставлять грузы надолго на чашках, особенно когда весы не арретированы.

Лабораторная работа 2

ВЗВЕШИВАНИЕ НА АНАЛИТИЧЕСКИХ ВЕСАХ

Цель работы:

1. Научиться пользоваться аналитическими весами.

2. Научиться определять плотность тела методом гидростатического взвешивания.

Задания при подготовке к работе

1. Что такое масса?

2. Какие методы измерения массы вы знаете?

3. Какая физическая величина измеряется при взвешивании на рычажных весах?

4. Сформулируйте закон Архимеда.

Метод измерения

Масса − одно из основных понятий в физике. Масса тела – это физическая величина, являющаяся мерой инертности тела. Величину массы можно определить по различным ее проявлениям (инерция, тяготение) путем сравнения с массой эталонного тела, принятой за единицу. Масса и вес тела, находящегося на горизонтальной опоре, связаны соотношением

$$P = mg, \tag{1}$$

поэтому обычно массу определяют с помощью весов.

Принцип взвешивания на весах

Аналитические весы представляют собой рычаг первого рода (рис. 9), в котором расстояние от точек приложения сил до точек опоры равны друг другу (равноплечий рычаг). Если m_1 – масса тела на левой чашке, а m_2 – масса разновесов на правой чашке, то при равновесии (указатель равновесия – стрелка) на основании правила моментов сил имеем: $P_1 \cdot l_1 = P_2 \cdot l_2$ и т.к. весы равноплечие ($l_1 = l_2$), то при равновесии $P_1 = P_2$ и $m_1 = m_2$. Таким образом, при взвешивании тел на рычажных весах мы сравниваем силу, с которой масса взвешиваемого тела притягивается к Земле, с силой притяжения к Земле эталонной массы. Так как эталоном при этом является масса, то фактически взвешивание на рычажных весах сводится к определению массы. Поскольку в данной точке g для всех тел одинаково, масса тела однозначно определяет и его вес. В этом смысле операцию сравнения масс, выполняемую на рычажных весах, можно назвать взвешиванием.

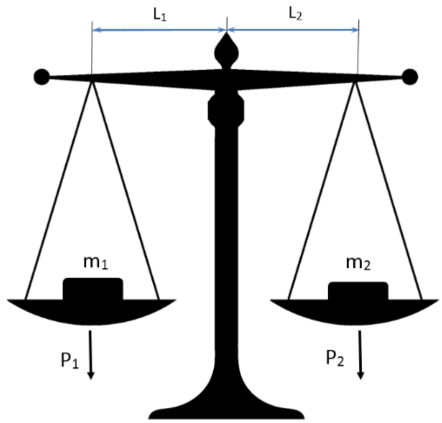


Рис. 9. Равноплечие весы

Чувствительность аналитических весов

Чувствительностью аналитических весов называется тангенс угла, на который отклоняется стрелка уравновешенных весов под действием перегрузка 1 мг

$$S = \frac{tg\alpha}{\mathrm{m}}.$$

При малых углах tg α пропорционален числу делений «n», на которое отклонится стрелка. Тогда чувствительность весов численно равна числу делений, на которое отклонится стрелка под действием перегрузка массой 1 мг.

Величина, обратная чувствительности, называется ценой деления (C). Цена деления численно равна массе перегрузка, вызывающего отклонение стрелки на одно деление: $C = \frac{1}{S} = \frac{m}{tg\alpha} \left(\frac{мг}{дел}\right)$.

Описание экспериментальной установки

Весы АДВ-200 – автоматические демпферные весы (с воздушным торможением). Они снабжены световым экраном (вайтографом), позволяющим определять перегрузку весов с точностью до 0,1 мг.

Демпфер – приспособление, гасящее колебание весов. Взвешивание на таких весах до некоторой степени автоматизировано. На чашки весов помещают лишь крупные разновесы (не меньше 1 г), мелкие разновесы (десятки и сотни миллиграммов) устанавливаются на весы автоматически с помощью лимбов. При вращении большого лимба устанавливаются сотни миллиграммов, малого лимба – десятки миллиграммов. Единицы миллиграммов и десятые доли отсчитываются на световом экране вайтографа по отклонению стрелки от нуля.

Правила взвешивания

1. Прежде чем пользоваться весами, следует убедиться, что они исправны (чашки симметрично подвешены к сережкам, сережки точно установлены на призмы, коромысло не перекошено). Для проверки этого следует (убедившись, что весы не нагружены и оба лимба на нулях) включить вилку освещения шкалы весов в розетку (220 В) и, плавно открывая арретир, наблюдать за шкалой. Тень стрелки весов должна быть в пределах шкалы. Если тень резко уходит к краям шкалы, значит весы неисправны, следует обратиться к лаборанту.

Передвигая шкалу с помощью корректора, установите, если необходимо, стрелку на нулевое деление. Если это сделать не удается, нужно заметить нулевую точку весов и при отсчетах веса вводить поправку.

2. Помещать на чашки и снимать тела и разновесы можно только при закрытом арретире.

3. Открывать и закрывать арретир нагруженных весов нужно осторожно и плавно. Если стрелка сразу идет в «плюсы», надо закрыть арретир и добавить разновесов на правую чашку; если стрелка идет в «минусы» – убавить.

4. Подбор гирь необходимо начинать с крупных, близких массе тела, далее использовать более мелкие по порядку до 1 г.

5. В конце работы поднять арретир и разгрузить весы (и по лимбам тоже).

Поправка на потерю веса тела в воздухе

Все предыдущие рассуждения относились к взвешиванию тел в пустоте. При взвешивании в воздухе на тела и гири действует архимедова выталкивающая сила. Т.к. объемы взвешиваемых тел и гирь обычно неодинаковы, то неодинаковы и выталкивающие силы. При равновесии

$$m_т\,g - F_{Ат} = m_г\,g - F_{Аг} \qquad (2)$$

где индекс «т» – тело, «г» – гиря, $F_{Ат}$ и $F_{Аг}$ – архимедовы силы, действующие на тело и гири. Архимедова выталкивающая сила в общем случае равна $F_A = \rho V g$, тогда, если тело в воздухе

$$m_т\,g - F_{Ат} = m_{г1}\,g - F_{Аг},$$

$$m_т\,g - \rho_{возд}V_т\,g = m_{г1}\,g - F_{Аг1} \qquad (3)$$

Если тело в воде:

$$m_т\,g - \rho_{вод}V_т\,g = m_{г2}\,g - F_{Аг2} \qquad (4)$$

Так как гири в обоих случаях находятся в воздухе, то силы Архимеда, действующие на них пренебрежимо малы, так же в нашем эксперименте мала сила Архимеда, действующая на тело в воздухе. Из (3) и (4) следует

$$m_т\,g = m_{г1}\,g\ , \qquad (5)$$

$$m_т\,g - \rho_{возд}V_т\,g = m_{г2}\,g\ . \qquad (6)$$

Представим массу тела через плотность и объем и разделим (5) на (6)

$$\frac{\rho_т V_т}{\rho_т V_т - \rho_{вод} V_т} = \frac{m_{г1}}{m_{г2}} = \frac{m_1}{m_2}\ ,$$

$$\frac{\rho_т}{\rho_т - \rho_{вод}} = \frac{m_1}{m_2}\ .$$

Отсюда

$$\rho_т = \frac{m_1}{m_1 - m_2}\rho_{вод}\ .$$

Задания при выполнении работы

1. Взвесить тело (шарик) в воздухе. Шарик подвешивается за петлю на сережку. По формуле (3) учесть поправку на потерю веса в воздухе.

2. Взвесить шарик в воде. Сначала подвешивают шарик (как в п. 1). Затем снизу подводят стакан с водой, под стакан – подставку. При этом подставка не должна нигде касаться чашки весов, шарик должен быть полностью погружен в воду и не должен касаться дна и стенок стакана, на поверхности шарика не должно быть прилипших пузырьков воздуха. Все это делается, разумеется, при закрытом арретире весов.

Если m_1 – масса тела в воздухе, m_2 – масса тела в воде, то плотность тела будет равна:

$$\rho_т = \frac{m_1}{m_1 - m_2}\rho_{вод}\ , \qquad (7)$$

где $\rho_{вод}$ – плотность воды.

Вычислить по формуле (7) плотность тела, определить «S_ρ» и «Δ», записать результат.

Вопросы к защите работы

1. Что такое чувствительность весов?

2. Что такое демпфер?

3. Для каких тел поправка на потерю веса в воздухе значительна? Обоснуйте.

4. Как можно определить плотность материала, из которого изготовлена чайная ложка?

5. Предложите способ определения плотности куска сахара или кристалла соли.

6. Что тяжелее – 1 кг стали или 1 кг дерева?

7. Какими бывают рычаги? Сколько существует их разновидностей? Приведите примеры.

Лабораторная работа 3

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНОВ РАВНОУСКОРЕННОГО ДВИЖЕНИЯ НА МАШИНЕ АТВУДА

Цель работы:

1. Проверить закон пути $H = {at^2}/{2}$.
2. Проверить II закон Ньютона.

Задания при подготовке к работе

1. Какое движение называется равноускоренным?
2. При каком условии тело движется равноускоренно?
3. Как можно экспериментально проверить закон пути?
5. Сформулируйте законы динамики Ньютона.
4. Как экспериментально проверить II закон Ньютона?

Метод измерения

Движение, при котором скорость за любые равные промежутки времени изменяется на одинаковую величину, называют равнопеременным движением. При увеличении скорости движение называют равноускоренным, при уменьшении – равнозамедленным.

Величина ускорения может быть установлена следующим образом. Рассмотрим блок, через который перекинута нить с грузами C_1 и C_2 одинаковой массы m_1 (рис. 10). Если на груз C_2 положить один из добавочных перегрузков m, то вся система начнет двигаться равноускоренно. На каждый груз действуют две силы – сила тяжести и сила натяжения нити, под действием которых движутся грузы. Если предположить, что нить нерастяжима, то ускорения правого и левого грузов будут равны и противоположны по знаку. Если учесть, что блок имеет массу, хотя и небольшую, то натяжения нитей по обе стороны блока будут различны. На основании второго закона Ньютона можно записать:

для груза C_1: $m_1\vec{a} = m_1\vec{g} + \vec{T}_1;$

$(m + m_1)\vec{a} = (m + m_1)\vec{g} + \vec{T}_2$ – для груза C_2, масса которого равна сумме масс груза и перегрузка $m_2 = m + m_1$,

$I\vec{\varepsilon} = \vec{M}$ – для блока.

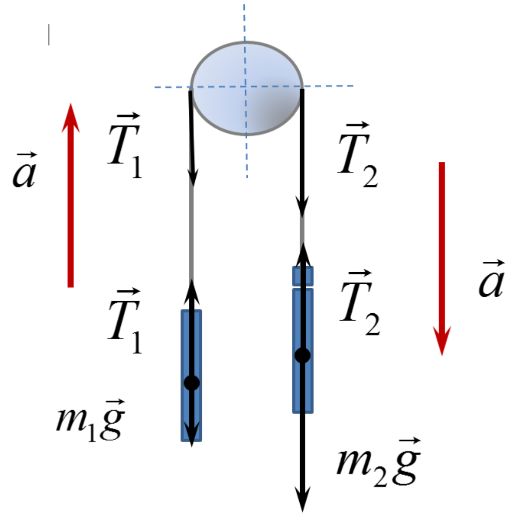


Рис. 10. Схема сил, действующих на движущиеся грузы

Проектируя на оси координат, получим:

$$m_1 a = T_1 - m_1 g;$$
$$(m + m_1)a = (m + m_1)g - T_2;$$
$$\frac{1}{2}m_0 r^2 \cdot \varepsilon = (T_2 - T_1)r,$$

где T_2 и T_1 – силы натяжения нити; ε – угловое ускорение; m_0 – масса блока; r – радиус блока; $I = \frac{1}{2}m_0 r^2$ – момент инерции блока.

Если нить нерастяжима, то $a = \varepsilon r$. Решая систему уравнений, описывающих систему движущихся тел, получим:

$$a = \frac{m}{m_1 + m_2 + \frac{m_0}{2}} g \quad или \quad a = \frac{m}{2m_1 + m + \frac{m_0}{2}} g.$$

Отсюда следует, что система будет двигаться с ускорением меньшим, чем ускорение свободного падения.

При условии $m \ll m_1, m \ll m_0$ получим:

$$a \cong \frac{m}{2m_1 + \frac{m_0}{2}} g,$$

т.к. m_1 и m_0 имеют постоянное значение, то ускорение линейно зависит от m.

Ускорение так же можно найти по формуле пути равноускоренного движения: $h = \frac{at^2}{2}$, следовательно $a = \frac{2h}{t^2}$.

Описание экспериментальной установки

С помощью машины Атвуда, изображенной на рис. 11, можно проверить законы кинематики прямолинейного движения и II закон Ньютона.

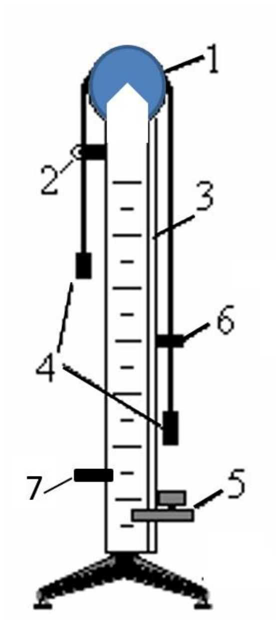


Рис. 11. Схема машины Атвуда

Прибор состоит из блока (1), электромагнитного пускателя (2), шкалы с сантиметровыми делениями (3), грузов (4), приемного столика (5), подвижного кольца (6), ограничителя (7).

Электромагнитный пускатель служит для пуска и остановки грузов, при этом включается и выключается секундомер.

При подаче напряжения, якорь притягивается к сердечнику электромагнита, и нить системы грузов надежно фиксируется в требуемом положении. Для регулировки зазора между якорем и сердечником пускателя служит регулировочный винт. Оптимальная величина зазора 1–2 мм. Необходимо следить, чтобы нить с грузами свободно перемещалась в зазоре между якорем и сердечником и не касалась их.

Приемный столик предназначен для разрыва электрической цепи счетчика секундомера и, следовательно, прекращения отсчета времени в тот момент, когда груз опустится на его площадку.

Подвижное кольцо предназначено для включения отсчета времени через какой-либо промежуток времени после того, как грузы начнут движение. При прохождении через подвижное кольцо груза, снабженного перегрузком в форме треугольника, последний задерживается в кольце, замыкает электрическую цепь и включает секундомер. Ограничитель предназначен для установки грузов на нулевом делении во время опытов.

При проведении опытов с прибором отсчет времени производится электронным счетчиком-секундомером с точностью до 0,01 с. Непрерывный отсчет времени достигается, если переключатель «счет» поставлен напротив надписи «секунды». Кнопка «пуск» предназначена для проверки работы прибора. Необходимо после каждого опыта приводить световой индикатор в нулевое положение путем использования кнопки «сброс».

Питание электромагнитного пускателя осуществляется от селенового выпрямителя типа ВС-24М или аналогичного с рабочим напряжением 4–8 В.

Задания при планировании эксперимента

1. Подготовьте таблицы измерений для заданий.

2. Как можно изменить силу (в задании 2), не изменяя при этом массу системы?

3. Как движутся грузы C_1 и C_2 после снятия перегрузка кольцевой платформой?

Задания при выполнении работы

1. Проверка закона пути.

Установив левый груз C_1 на верхнюю поверхность ограничителя (7) (при этом нижний торец правого груза C_2 должен находиться напротив нулевой отметки на шкале), замыкают цепь ключом, а нить системы грузов фиксируют в нулевом положении. На правый груз положить дополнительный перегрузок m = 4 г. Световой индикатор секундомера поставить в нулевое положение.

Установить подвижную платформу на расстоянии 20 см от правого груза, поднять приемный столик в ней, привести в движение систему размыканием ключа. Цепь питания электромагнитного пускателя будет прервана, нить системы освободится, секундомер начнет отсчет времени. При достижении правым грузом площадки приемного столика секундомер выключится. При проведении следующего опыта (перед замыканием ключа) площадку приемного столика необходимо приподнять легким нажимом снизу за подвижный шток.

Повторить опыты, увеличивая расстояние каждый раз на 20 см до максимально возможного. Измерение времени движения для каждого расстояния проводится не менее трех раз. Результаты занести в таблицу, по данным таблицы построить зависимость $h = f(t^2)$ и графически определить ускорение.

2. Проверка II закона Ньютона.

Второй закон Ньютона связывает 3 величины: силу, массу и ускорение. Для его проверки необходимо, оставив одну из величин постоянной, установить связь двух других величин. В работе изучается зависимость ускорения системы от силы при постоянной массе.

Чтобы масса системы при измерениях не менялась, перегрузки по 2 г в количестве 6–8 шт. накладываются на левый и правый грузы поровну, а затем перекладывают их по одному с левого груза на правый. Так будет создаваться разность в силах, действующих на эти платформы при постоянной массе системы. Измерения произвести при 3–4 значениях силы. Ускорение системы измеряется так же, как в задании 1.

Результаты занесите в таблицу, по ним постройте график $a = f(F)$ и по графику определите значение массы системы.

Вопросы к защите работы

1. Приведите примеры из окружающей жизни равномерного и равнопеременного движения.

2. Приведите примеры, доказывающие, что ускорение тела прямо пропорционально действующей на него силе.

3. Какова масса блока по результатам ваших измерений? Совпадает ли это значение с фактическим? Почему?

4. Докажите, что движение тела с постоянным ускорением совершается в одной плоскости. Какие знания по математике понадобились для этого?

Лабораторная работа 4

СЛОЖЕНИЕ ВЗАИМНО ПЕРПЕНДИКУЛЯРНЫХ КОЛЕБАНИЙ ОДИНАКОВОЙ ЧАСТОТЫ

Цель работы:

Изучить экспериментально зависимость вида траектории движения, получающейся от сложения взаимно перпендикулярных колебаний одинаковой частоты, от разности фаз.

Задания при подготовке к работе

1. Что такое фаза колебания?

2. Назовите основные величины, которые характеризуют колебательное движение.

3. Принимая фазу колебания, соответствующую прохождению маятника через положение равновесия за 0, определите фазу колебания для моментов времени, когда

а) $x = X_m$; б) $x = X_m/2$; в) $x = X_m/3$.

4. Определите, на каком расстоянии от положения равновесия должна находиться вершина воронки, чтобы фаза колебания была равна:

а) $\frac{\pi}{2}$; б) $\frac{\pi}{4}$; в) $2\boldsymbol{\pi}$; г) $\boldsymbol{\pi}$.

Метод измерения

Очень часто одно и то же тело совершает несколько колебательных движений одновременно. Эти колебания могут происходить с различными частотами и в различных направлениях. На основании принципа суперпозиции эти колебания можно сложить и рассчитать некоторое результирующее движение.

Большой интерес представляет рассмотрение оного из простейших случаев – сложение двух взаимно перпендикулярных колебаний, происходящих с одинаковой частотой. Маятник, подвешенный на нити, может совершать колебания вдоль оси x и вдоль оси y.

И те и другие колебания происходят с одинаковой частотой. Уравнение этих колебаний:

$$x = X\sin wt\,, \qquad (1)$$

$$y = Y\sin\,(wt + \varphi). \qquad (2)$$

Сделаем следующие преобразования:

из (1) $\Rightarrow \frac{x}{X} = \sin wt,$

из (2) $\Rightarrow \frac{y}{Y} = \sin wt \cdot \cos\varphi + \cos wt \cdot \sin\varphi = \frac{x}{X} \cdot \cos\varphi + \cos wt \cdot \sin\varphi,$

преобразуем следующим образом: $\frac{y}{Y} - \frac{x}{X} \cdot \cos\varphi = \cos wt \cdot \sin\varphi.$

Возведем обе части в квадрат

$$\left(\frac{y}{Y} - \frac{x}{X} \cdot \cos\varphi\right)^2 = \cos^2 wt \cdot \sin^2\varphi\,, \qquad (3)$$

из (1) получим $\frac{x}{X}\sin\varphi = \sin wt \cdot \sin\varphi$ и возведем в квадрат:

$$\left(\frac{x}{X}\right)^2 \sin^2\varphi = \sin^2 wt \cdot \sin^2\varphi \qquad (4)$$

Равенства (3) и (4) сложим почленно и упростим

$$\frac{y^2}{Y^2} - 2\frac{xy}{XY}\cos\varphi + \frac{x^2}{X^2} = \sin^2\varphi.$$

Полученное уравнение есть уравнение эллипса. Таким образом, в общем случае при сложении взаимно перпендикулярных колебаний результирующей траекторией является эллипс. Форма и ориентация эллипса зависит от соотношения между величинами X, Y,φ.

Исследуем некоторые частные случаи:

1. $X \neq Y$, $\varphi = 0$

$$\frac{y^2}{Y^2} - 2\frac{xy}{XY} + \frac{x^2}{X^2} = 0,\ \left(\frac{y}{Y} - \frac{x}{X}\right)^2 = 0,\ y = \frac{Y}{X}x\,.$$

То есть в этом случае движение маятника будет происходить по прямой, образующей с осью x угол α, который определяется $\mathrm{tg}\alpha = \frac{Y}{X}$.

При равенстве амплитуд X = Y, tg α = l, α = 45°.

2. X ≠ Y, $\varphi = \frac{\pi}{2}$

$$\frac{y^2}{Y^2} + \frac{x^2}{X^2} = 1\,.$$

Получается уравнение эллипса с полуосями X и Y, ориентированными по соответствующим координатным осям. При X = Y получаем уравнение окружности с радиусом R = X = Y.

Задания при планировании эксперимента

1. Определите период колебаний маятника с песком и без песка. Сравните их.

2. Толкните маятник вдоль оси x. В какой точке траектории следует толкнуть маятник вдоль оси y, чтобы разность фаз колебаний по оси x и y составляла $\varphi = 0$; $\varphi = \frac{\pi}{4}$; $\varphi = \frac{\pi}{2}$; $\varphi = \pi$?

Задания при выполнении работы

1. Насыпьте в воронку песок и приведите маятник в движение. Перемещая равномерно «экран» (лист текстолита), получите график колебания маятника. Из полученного графика определите скорость движения экрана.

2. Сложение колебаний. Приведите маятник с песком в колебание вдоль оси x с амплитудой X (амплитуду следует задавать с учетом размеров экрана, чтобы песок не сыпался мимо стола). В момент времени, когда фаза колебания вдоль оси x соответствует значениям $\varphi = 0$; $\varphi = \frac{\pi}{4}$; $\varphi = \frac{\pi}{2}$; $\varphi = \pi$, толкните маятник вдоль оси y. На экране получится результирующая траектория (фигура Лиссажу).

Полученные рисунки в определенном масштабе перенесите в свой отчет, дайте объяснение полученным результатам.

Вопросы к защите работы

1. При каких условиях траектория колебаний меняется: эллипс вырождается в окружность и прямую?

2. Какова будет результирующая траектория при разности фаз $\frac{3\pi}{2}$?

3. Что называется фигурами Лиссажу? Охарактеризуйте различные варианты фигур Лиссажу.

Лабораторная работа 5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ТЕЛА МЕТОДОМ БАЛЛИСТИЧЕСКОГО МАЯТНИКА И ПРОВЕРКА ЗАКОНА СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ

Цель работы:

1. Научиться определять скорость тела баллистическим методом.
2. Проверить закон сохранения энергии.

Задание при подготовке к работе

1. Что такое скорость?
2. Что такое баллистический маятник?
3. Что такое кинетическая энергия? Потенциальная энергия? Полная энергия?
4. Сформулируйте закон сохранения энергии.

Метод измерения

Шар, скатившись с высоты H (рис. 12), приобретает скорость v, которую можно рассчитывать исходя из закона сохранения энергии:

$$E + U = const \,,$$

где E – кинетическая энергия, U – потенциальная энергия.

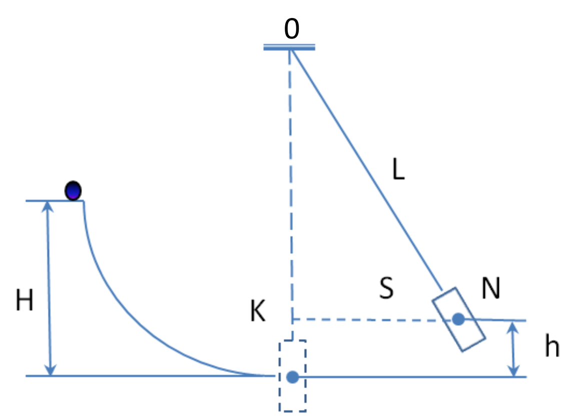


Рис. 12. Модель баллистического маятника

Кинетическая энергия скатившегося шара складывается из энергии поступательного и вращательного движения:

$$E_{пост} + E_{вр} = \frac{mv^2}{2} + \frac{Iw^2}{2}.$$

Момент инерции шара $I_{шара} = \frac{2}{5}\text{mR}^2$, угловая скорость $w = \frac{v}{R}$, следовательно,

$$mgH = \frac{mv^2}{2} + \frac{Iw^2}{2} = \frac{mv^2}{2} + \frac{2mR^2}{5 \cdot 2} \cdot \frac{v^2}{R^2},$$

$$gH = \frac{v^2}{2} + \frac{v^2}{5} = \frac{7v^2}{10}.$$

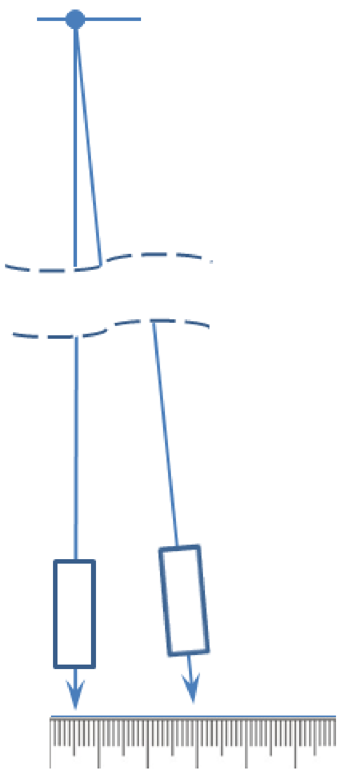


Рис. 13. Баллистический маятник

Для проверки справедливости полученного соотношения нужно определить скорость v опытным путем, для этого можно воспользоваться баллистическим маятником (рис. 13).

Маятник представляет собой подвешенное на длинных нитях тело. Он снабжен указателем (стрелкой), который при отклонении маятника перемещается вдоль шкалы, помещенной под маятником, и позволяет отмечать наибольшее отклонение S маятника от его первоначального положения. Если шар застревает в маятнике, то удар шара о маятник можно считать абсолютно неупругим. При этом предположении закон сохранения механического импульса записывается в виде:

$$mv = (M + m) \cdot u, \tag{1}$$

где m – масса шара;

v – скорость шара до удара о маятник;

M – масса маятника;

u – скорость шара и маятника после удара.

Откуда $v = \frac{(M+m) \cdot u}{m}$. (2)

По закону сохранения энергии:

$$\frac{(M+m)}{2}u^2 = (M+m)gh,$$

где h – высота подъема маятника.

Откуда $u = \sqrt{2gh}$.

Для определения h воспользуемся рис. 12. Из Δ KON имеем:

$$h = L(1 - cos\alpha),$$

здесь L – длина нитей маятника, α – угол отклонения маятника от положения равновесия.

Исходя из тригонометрической формулы $1 - cos\alpha = 2sin^2\frac{\alpha}{2}$, получим:

$$h = 2 \cdot L \cdot sin^2\frac{\alpha}{2}. \quad (3)$$

Для малых углов $sin\,\alpha = \alpha$, тогда $u = \sqrt{2gh} = 2\,sin\,\frac{\alpha}{2}\,\sqrt{gL}, \qquad u = \alpha\sqrt{gL}$.

Величину угла α можно определить из ΔKON:

$sin\alpha \approx \alpha = \frac{S}{L}$, следовательно, $u = \frac{S}{L}\sqrt{gL} = S\sqrt{\frac{g}{L}}$.

Подставим значение u в формулу (2): $v = \frac{M+m}{m} \cdot S\sqrt{\frac{g}{L}}$. (4)

Задания при планировании эксперимента

1. Как определить высоту, с которой скатывается шарик? Какие значения высоты вы планируете использовать?
2. Какие величины следует внести в таблицу измерений?
3. Как можно вычислить ошибку измерений «S_v» и «Δ»?

Задания при выполнении работы

1. Взвесить шарик.
2. Определить скорость шарика, скатившегося с высоты H баллистическим методом. С данной высоты шарик скатывать 3 раза.
3. Повторить опыт для трех различных значений H.

4. Вычислить скорость шарика теоретически из закона сохранения энергии. При вычислении брать те значения H, для которых скорость определялась экспериментально.

5. Сравнить полученные значения скорости (теоретические и экспериментальные) и дать объяснения получившихся результатов.

Вопросы к защите работы

1. При каких предположениях справедлива формула (4)?

2. Как повлиял на результаты тот факт, что скорость шарика в момент схода с желоба направлена не горизонтально?

3. Как можно определить суммарные силы сопротивления, действующие на шарик при его движении?

4. При движении по желобу с одной и той же высоты какое тело, цилиндр или шар, будет иметь в конце пути большую скорость? Массы и радиусы шара и цилиндра одинаковые.

Лабораторная работа 6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКОРОСТИ ПОЛЕТА СНАРЯДА

Цель работы: определение скорости полета снаряда, проверка закона сохранения энергии, определение КПД пружинной пушки.

Необходимое оборудование: пушка, пружины разной жесткости (в дальнейшем обозначаемые как пружина 1 и пружина 2), снаряды различной массы (снаряд 1, $m = 22{,}9$ г, снаряд 2, $m = 6{,}9$ г), набор грузов, прибор для измерения времени (измерительная система ИСМ 1).

Вопросы к допуску

1. Дайте определение кинетической, потенциальной и полной механической энергий.

2. Сформулируйте закон сохранения полной механической энергии. Какие превращения энергии происходят в ходе выполнения работы?

3. Запишите формулу закона Гука. От каких параметров зависит коэффициент жесткости?

4. Опишите принцип действия установки в данной лабораторной работе.

Описание установки

Внешний вид лабораторной установки показан на рисунке 14. Основной ее частью является пружина (1), закрепленная на стержне (2). Пружина снабжена специальным механизмом (3), служащим для взвода ее в рабочее положение и позволяющим поэтапно деформировать пружину на определенную величину с шагом 25 мм. Входной фотодатчик (4) и выходной фотодатчик (5), подключенные к измерительной системе ИСМ 1 (6), позволяют зарегистрировать время пролета снаряда. Каждый датчик содержит светодиод инфракрасного излучения в нижней части и приемный фотодиод в верхней части. Датчики срабатывают при перекрывании светового потока снарядом или другим предметом. Снаряд, пролетевший сквозь выходной датчик, застревает в пластилине приемного устройства (7).

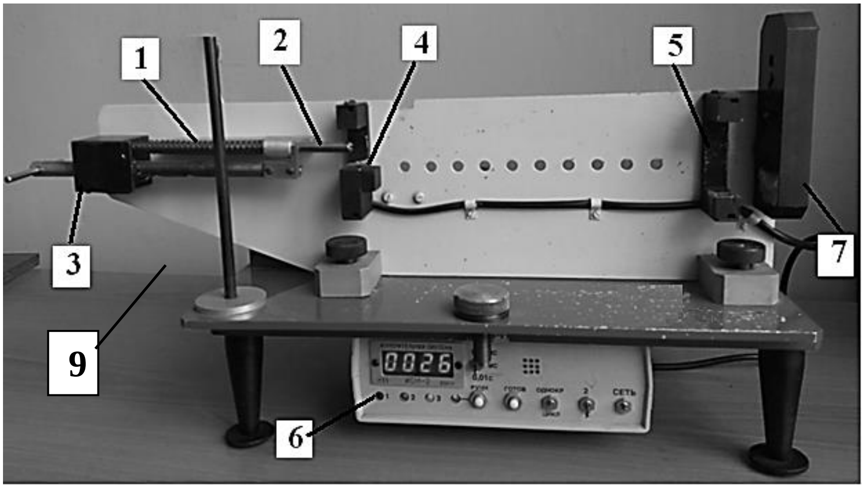


Рис. 14. Лабораторная установка

I. Определение скорости снаряда по времени пролета

На стержень (2), укрепленный в кронштейне, надевается пружина (отогнутый фигурный хвостик пружины опускается в прорезь кронштейна), а затем устанавливается снаряд. Снаряд представляет собой металлический цилиндр с осевым отверстием, диаметр которого незначительно превышает диаметр стержня. Спусковое устройство содержит рейку с фиксирующими вырезами и закрепленные на ней зацеп и рукоятку. В кронштейне установлен фиксатор, задающий четыре положения рейки с шагом в 25 мм.

При движении зацепа влево пружина сжимается, и после первого щелчка фиксатора (положение 1) ее деформация составляет 25 мм. При дальнейшем движении зацепа и втором щелчке деформация пружины возрастает до 50 мм (положение 2). При третьем и четвертом положениях фиксатора величина сжатия пружины составляет соответственно 75 и 100 мм.

Выстрел осуществляется поворотом рукоятки, при этом зацеп выходит из фиксирующего выреза и освобождает сжатую пружину, которая, распрямляясь, выталкивает снаряд. Расстояние между датчиками фиксировано и составляет L = 250 мм.

Рассмотрим движение снаряда после выстрела. Выберем систему координат, начало которой совпадает с положением снаряда до выстрела, а ось X параллельна поверхности стола. На снаряд в полете действует только сила тяжести, направленная вертикально вниз (силой сопротивления воздуха пренебрегаем вследствие ее малости). Следовательно, горизонтальная проекция скорости снаряда V_X остается постоянной и численно равна

$$v_x = \frac{L}{\tau}, \qquad (1)$$

где L – расстояние между датчиками, τ – время движения снаряда. Вертикальная проекция скорости снаряда под действием силы тяжести V_y растет по закону:

$$v_y = g\tau, \qquad (2)$$

где g – ускорение свободного падения. Полная скорость снаряда равна:

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}. \qquad (3)$$

Однако, проделав пробный выстрел, мы убеждаемся, что время пролета снаряда между датчиками крайне мало и составляет величину порядка нескольких десятков миллисекунд. За такое время вертикальная составляющая скорости снаряда υ_y не успевает сколько-нибудь значительно измениться, и ее значением в формуле (3) можно пренебречь.

Таким образом, скорость полета снаряда можно считать по формуле (1). Чем больше деформирована пружина перед выстрелом, тем большую скорость она сообщает вылетающему снаряду. Проделывают измерения, стреляя из разных положений, используя разные пружины и снаряды. Результаты измерений заносятся в таблицу 1 (измерения производить не менее 5 раз в каждом опыте).

Рассчитайте погрешность измерений скорости.

Таблица 1 – Время пролета и скорость полета снарядов

Пружина 1			
Снаряд 1		Снаряд 2	
t, мс	V, м/с	t, мс	V, м/с
Пружина 2			
Снаряд 1		Снаряд 2	
t, мс	V, м/с	t, мс	V, м/с

II. Определение скорости снаряда по закону сохранения энергии

Скорость снаряда можно определить, используя закон сохранения энергии. Пренебрегая трением, существующим в системе, можем считать, что потенциальная энергия упруго деформированной пружины при выстреле переходит в кинетическую энергию снаряда. В соответствии с этим запишем закон сохранения энергии:

$$\frac{k\Delta x^2}{2} = \frac{mv^2}{2}, \qquad (4)$$

где k – коэффициент жесткости пружины, Δx – величина деформации пружины, m и v – соответственно масса и скорость снаряда.

Тогда скорость снаряда:

$$v = \sqrt{\frac{k}{m}}\Delta x. \qquad (5)$$

Массы снарядов определяют взвешиванием на технических весах. Жесткость пружин определяется с помощью метода статической деформа**ции.** Для этого пружина устанавливается на вертикальный стержень (9), расположенный на станине установки. Сверху на пружину помещают специальный груз, имеющий осевое отверстие. Пружина под действием груза сжимается до тех пор, пока сила упругости пружины не уравновесит силу тяжести груза, то есть пока не будет выполнено условие:

$$k\Delta x = Mg, \qquad (6)$$

где M – масса груза, k – искомый коэффициент жесткости пружины.

Тогда жесткость пружины:

$$k = \frac{Mg}{\Delta x}. \qquad (7)$$

Поскольку в нашем распоряжении имеется набор грузов, нужно определить коэффициент жесткости пружины несколько раз, используя один, два и три груза. Измерения выполните для обеих пружин, результаты занесите в таблицу 2.

Таблица 2 – Коэффициенты жесткости используемых пружин

Пружина 1			
М, кг	Δx, м	k_1, Н/м	$k_{сред}$, Н/м
Пружина 2			
М, кг	Δx, м	k_2, Н/м	$k_{сред}$, Н/м

Теперь, зная жесткость пружины, можно определить скорость снарядов по формуле (5), результаты занесите в таблицу 3.

Таблица 3 – Скорости снарядов, определенные с помощью закона сохранения энергии

Пружина 1							
Снаряд 1				Снаряд 2			
k, Н/м	m, кг	Δx, м	v, м/с	k, Н/м	m, кг	Δx, м	v, м/с
Пружина 2							
Снаряд 1				Снаряд 2			
k, Н/м	m, кг	Δx, м	v, м/с	k, Н/м	m, кг	Δx, м	v, м/с

Вопросы к защите

1. Почему горизонтальную составляющую скорости в работе можно считать постоянной?

2. Если ударить молотком по большому куску стали, молоток отскочит, а если по куску свинца, то нет. Какому металлу при однократном ударе передастся больше энергии? Кинетическую энергию молотка в момент удара считать в обоих случаях одинаковой.

3. Почему при вбивании гвоздя его шляпка слабо нагревается, но, когда гвоздь уже забит, достаточно нескольких ударов, чтобы значительно нагреть его шляпку?

Лабораторная работа 7

ИЗУЧЕНИЕ ЗАКОНА СОХРАНЕНИЯ ИМПУЛЬСА

Цель работы: проверить выполнение законов сохранения импульса и энергии при соударении тел, оценить погрешность опытов.

Оборудование: специальная установка, набор тел (шайб), весы.

Задание при подготовке к работе

1. Запишите закон сохранения импульса (ЗСИ): а) для замкнутой механической системы; б) при упругом центральном ударе двух тел; в) при неупругом центральном ударе?

2. Запишите закон сохранения механической энергии (ЗСМЭ) при упругом центральном ударе двух тел?

3. В каких ударах выполняются: а) ЗСМЭ; б) ЗСИ; в) оба закона?

Описание установки

Установка состоит из горизонтально расположенного рабочего поля 3 (рис. 15) с нанесенной координатной сеткой, по которому перемещаются взаимодействующие тела 1 и 2. Начальную скорость телу 1 в направлении оси *X* сообщает ударный пружинный механизм 5. Перед выстрелом тело 1 фиксируется между направляющими 6. Ударный механизм снабжен винтом 4, изменяя положение которого можно изменять начальный импульс тела 1.

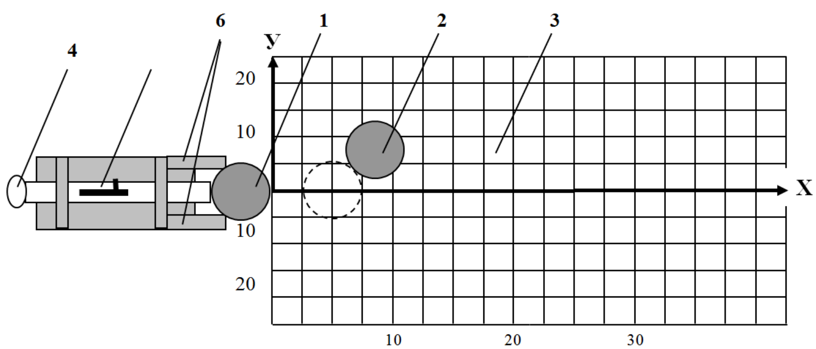


Рис. 15. Схема установки для определения импульса тела

Описание метода измерений

Боёк ударного пружинного механизма, ударяя по телу 1 (рис. 16), сообщает ему начальный импульс, значение которого перед взаимодействием тел

$$\overrightarrow{P_0} = m_1 \overrightarrow{v_0}\ , \tag{1}$$

где m_1 – масса первого тела, $\overrightarrow{v_0}$ – начальная скорость тела.

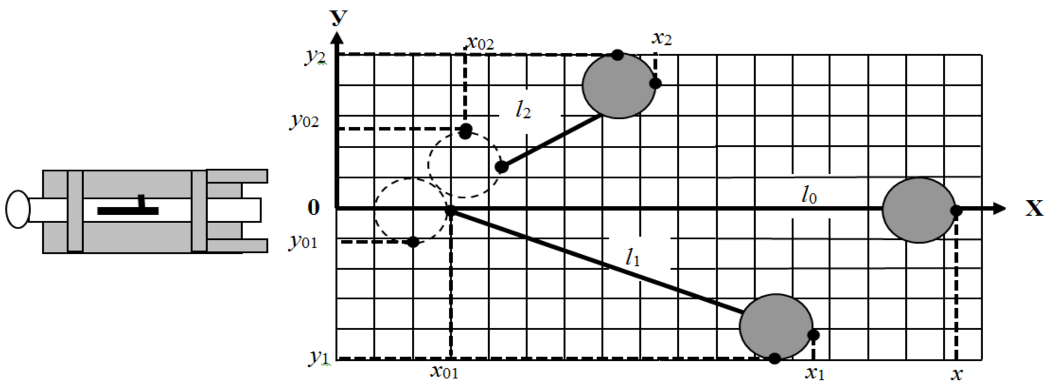


Рис. 16. Схема перемещения тел для определения длины пути

Начальную скорость тела $\mathrm{v}_о$ можно оценить по длине пути $l_о$, пройденному телом по рабочему полю до остановки при свободном движении. Работа силы трения по определению равна $A_{mp} = -\mu mgl$. По теореме о кинетической энергии эта работа равна приращению энергии тела

$$A_{mp} = \Delta E = 0 - \frac{m\mathrm{v_o}^2}{2}. \tag{2}$$

Учитывая это, найдем начальную скорость тела

$$\mathrm{v}_{\hat{\imath}} = \sqrt{2g\mu l_{\hat{\imath}}}\ . \tag{3}$$

Следует отметить, что $\mathrm{v_o}$– скорость шайбы в момент соударения, когда она находится на расстоянии l_0 от точки, где остановится.

После взаимодействия тела начинают двигаться со скоростями $\overrightarrow{v_1}$ и $\overrightarrow{v_2}$ соответственно. Их суммарный импульс:

$$\vec{P} = m_1\overrightarrow{v_1} + m_2\overrightarrow{v_2}\ , \tag{4}$$

где скорости 1 и 2 тела после взаимодействия могут быть найдены по формулам

$$\mathrm{v}_1 = \sqrt{2g\mu l_1}\,, \qquad (5а)$$

$$\mathrm{v}_2 = \sqrt{2g\mu l_2}\,, \qquad (5б)$$

l_1, l_2 – расстояния, которые пройдут тела после взаимодействия.

Длину пути l_0 при свободном движении тела 1 (в отсутствие второго тела), а также после соударения l_1 и l_2, определяют по изменению координат x и y крайних точек тел (рис. 16).

$$l_o = \Delta x = x - x_{o1}$$

$$l_1 = \sqrt{(\Delta x_1)^2 + (\Delta y_1)^2} = \sqrt{(x_1 - x_{o1})^2 + (y_1 - y_{o1})^2}\,, \qquad (6)$$

$$l_2 = \sqrt{(\Delta x_2)^2 + (\Delta y_2)^2} = \sqrt{(x_2 - x_{o2})^2 + (y_2 - y_{o2})^2}\,.$$

В случае нецентрального удара первое тело продолжит движение под углом α к направлению оси X. При этом:

$$\sin\alpha = {\Delta y_1}/{l_1}, \quad \cos\alpha = {\Delta x_1}/{l_1}\,. \qquad (7)$$

Второе тело начнет двигаться под углом β к оси X

$$\sin\beta = {\Delta y_2}/{l_2}, \quad \cos\beta = {\Delta x_2}/{l_2}\,. \qquad (8)$$

Закон сохранения импульса в проекции на оси координат ОХ и ОУ принимает вид: на ось $0X$ $\qquad m_1\mathrm{v}_0 = m_1\mathrm{v}_1\cos\alpha + m_2 v_2\cos\beta$,

на ось $0У$ $\qquad 0 = m_1 v_1\sin\alpha - m_2\mathrm{v}_2\sin\beta$.

С учетом (6)–(8) закон сохранения импульса принимает вид:

проекция на ось ОХ $\qquad m_1\sqrt{l_o} = \dfrac{m_1\Delta x_1}{\sqrt{l_1}} + \dfrac{m_2\Delta x_2}{\sqrt{l_2}}$,

проекция на ось ОУ $\qquad 0 = \dfrac{m_1\Delta y_1}{\sqrt{l_1}} - \dfrac{m_2\Delta y_2}{\sqrt{l_2}}$. $\qquad (9)$

До взаимодействия кинетическая энергия системы была равна

$$E_{нач} = \frac{m_1\mathrm{v}_o^2}{2} = \mu m_1 g\, l_0, \qquad (10)$$

а после взаимодействия энергию системы можно найти как сумму:

$$E_{конеч} = \frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \mu m_1 g l_1 + \mu m_1 g l_2 . \qquad (11)$$

При абсолютно упругом ударе энергия системы не меняется:

$E_{нач} = E_{конеч}$, и коэффициент восстановления энергии $k = \frac{E_{êîíå÷}}{E_{íà÷}} = 1$.

При неабсолютно упругом ударе $E_{нач} > E_{конеч}$, и коэффициент восстановления энергии $k < 1$.

Задание 1. Сравнение импульсов и энергий тел до и после взаимодействия:

1. Выберите два тела примерно одинаковой массы, определите её и запишите m_1 и m_2 в табл. 1.

Таблица 1

<table>
<tr><td colspan="2">Начальные координаты и массы тел</td><td colspan="2">$m_1 =$
$x_{01} =$
$y_{01} =$</td><td colspan="2">$m_2 =$
$x_{02} =$
$y_{02} =$</td></tr>
<tr><td colspan="6">Конечные координаты тел</td></tr>
<tr><td colspan="2">при свободном движении</td><td colspan="4">после взаимодействия</td></tr>
<tr><td>№ п.п.</td><td>x, мм</td><td>x_1, мм</td><td>y_1, мм</td><td>x_2, мм</td><td>y_2, мм</td></tr>
<tr><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>2</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>3</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>4</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>5</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>6</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>7</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>Среднее</td><td>$\bar{x} =$</td><td>$\bar{x}_1 =$</td><td>$\bar{y}_1 =$</td><td>$\bar{x}_2 =$</td><td>$\bar{y}_2 =$</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Приращение координаты Δ</td><td>$\Delta x = \bar{x} - x_{o1}$</td><td>$\Delta x_1 = \bar{x}_1 - x_{o1}$</td><td>$\Delta y_1 = \bar{y}_1 - y_{o1}$</td><td>$\Delta x_2 = \bar{x}_2 - x_{o2}$</td><td>$\Delta y_2 = \bar{y}_2 - y_{o2}$</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="2">Расстояние</td><td>$l_0 = \Delta x$</td><td colspan="2">$l_1 = \sqrt{(\Delta x_1)^2 + (\Delta y_1)^2}$</td><td colspan="2">$l_2 = \sqrt{(\Delta x_2)^2 + (\Delta y_2)^2}$</td></tr>
<tr><td></td><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td></tr>
</table>

2. Определите скорость тела 1 при свободном движении. Для этого взведите пружинный механизм, зафиксируйте его в первом пазу. Шайбу 1 вставьте в направляющие до упора. Запишите её начальные координаты (см. рис. 16). Произведите выстрел и занесите в табл. 1 координату x крайней точки шайбы.

3. При тех же условиях повторите опыт еще 6 раз. Результаты занесите в табл. 1 и рассчитайте среднее значение $\bar{x}$ и расстояние $\bar{l}_o$ (1).

4. Установите тело 1 в исходное положение. Тело 2 установите в одном из закрашенных кругов. Запишите начальные координаты крайних точек второго тела (рис. 16). Произведите выстрел и занесите в табл. 1 координаты крайних точек тел.

5. При тех же условиях повторите опыт еще 6 раз. Результаты занесите в табл. 1. Рассчитайте средние значения $\bar{x}_1$, $\bar{y}_1$, $\bar{x}_2$, $\bar{y}_2$; приращения координат Δx_1, Δy_1, Δx_2, Δy_2 и перемещения тел $\bar{l}_1$ и $\bar{l}_2$.

6. Рассчитайте по формуле (9) величины, пропорциональные проекциям импульсов тел на оси координат до и после соударения, и занесите результаты в табл. 2.

Таблица 2

Импульс	**до удара**	**после удара**
Вдоль оси X	$m_1\sqrt{l_o}$	$m_1\frac{\Delta x_1}{\sqrt{l_1}}+m_2\frac{\Delta x_2}{\sqrt{l_2}}$
Вдоль оси $У$	0	$m_1\frac{\Delta y_1}{\sqrt{l_1}}-m_2\frac{\Delta y_2}{\sqrt{l_2}}$

7. Сравните результаты и сделайте выводы.

8. Рассчитайте величины, пропорциональные энергиям до и после соударения (см. формулу 10 и 11) и занесите результаты в табл. 3.

Таблица 3

	до удара	после удара
Энергия	$m_1 l_o$	$m_1 l_1 + m_2 l_2$
Коэффициент восстановления	$[m_1 l_1 + m_2 l_2] / m_1 l_0 =$	

9. Сделайте выводы.

10. Повторите опыт по пп. 1–9 для тел разной массы. Результаты занесите в таблицы, аналогичные таблицам 1–3.

Задание 2. Простейшая оценка погрешности измерений.

В качестве **систематической погрешности** в данных опытах следует взять приборную погрешность, равную цене деления измерительного прибора.

Случайная погрешность определяется по разбросу выборки:

$$\Delta_x = \frac{(x_{\max} - x_{\min})}{2},$$

где $x_{\max}$ и $x_{\min}$ – максимальное и минимальное значения измеряемой величины в серии из N повторных измерений. Этой границе доверительного интервала, совпадающего с Δ, соответствует доверительная вероятность

$$P = 1 - \left(\frac{1}{2}\right)^{N-1}.$$

В табл. 4 занесите средние значения прямых измерений, выполненных в одном из упражнений и значения погрешностей этих величин – систематической и случайной.

2. Для каждой величины выберите наибольшую из погрешностей, рассчитанных в п. 1, и определите наибольшую относительную погрешность δ измерения каждой величины. В окончательном выводе следует отметить, для каких величин желательно увеличить (и как?) точность измерений, а для каких её можно и уменьшить без ущерба для конечного результата.

Таблица 4

Величина	Значение	Абсолютная погрешность		Наибольшая из них	
		систематич. Δ_S	случайная Δ	абсолют. Δ	относит. δ
m_1 (кг)			–		
m_2 (кг)			–		
x_{01} (мм)			–		
y_{01} (мм)			–		
x_{02} (мм)			–		
y_{02} (мм)			–		
x_1 (мм)					
y_1 (мм)					
x_2 (мм)					
y_2 (мм)					

3. Погрешность измерения величины импульса и энергии в первом приближении можно считать равной (во всяком случае не выше) относительной погрешности менее точно измеренной величины (в табл. 4). С учетом этого сделайте вывод о выполнении законов сохранения импульса и энергии, либо о причинах их невыполнения в проведенных опытах и степени упругости ударов.

Контрольные вопросы

1. Почему соударяющиеся шайбы можно считать замкнутой системой?

2. Как записывают ЗСИ при измерениях в упругом и неупругом ударах?

3. Какие прямые измерения необходимо сделать в работе для проверки выполнения ЗСИ?

4. От каких величин зависит: а) скорость ударяющего тела; б) импульс и скорость тел после неупругого удара?

5. Какой удар называется центральным?

6. Какой удар называется нецентральным?

7. От чего зависит направление движения тел после нецентрального удара?

Лабораторная работа 8

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСКОРЕНИЯ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ ПРИ СВОБОДНОМ ПАДЕНИИ ТЕЛ

Цель работы:

1. Экспериментально изучить зависимость времени падения шарика от высоты и сравнить полученную зависимость с теоретической.

2. Определить ускорение свободного падения и сравнить его с табличным значением.

Задания при подготовке к работе

1. Что называется силой тяготения? От чего она зависит?

2. Что такое центробежная сила инерции? Где на Земле эта сила минимальная, где максимальная?

3. Что такое сила тяжести? Где на Земле сила тяжести совпадает по величине и направлению с силой тяготения?

4. Что такое вес? Как зависит вес тела от широты места?

5. Что называется свободным падением? При каком условии падение маленького металлического шарика можно считать свободным?

Метод измерения

Земля вследствие суточного вращения является системой неинерциальной. На тело, находящееся на поверхности Земли на широте φ, действуют две силы: сила тяготения и центробежная сила инерции:

$$f_{тяг} = G\frac{mM}{R^2}$$

$$f_u = mrw,$$

где G – постоянная тяготения; M – масса Земли;

R – радиус Земли; m – масса тела;

r – расстояние его до оси вращения;

w – угловая скорость вращения Земли.

Сумма этих двух сил называется силой тяжести (рис. 17).

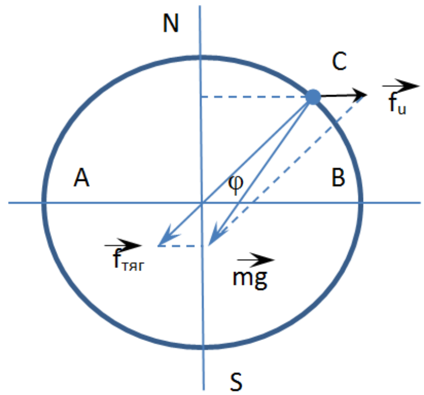


Рис. 17. Сложение силы тяготения и силы инерции на широте φ

Вес – это сила, действующая на опору или подвес и обусловленная силой тяжести. Движение тела под действием силы тяжести в безвоздушном пространстве называется свободным падением. Ускорение, с которым движется тело при свободном падении, называется ускорением силы тяжести (ускорением свободного падения).

Явление падения тел изучал знаменитый итальянский ученый Галилео Галилей; им было установлено, что ускорение свободного падения одинаково для всех тел различной массы (в данном месте).

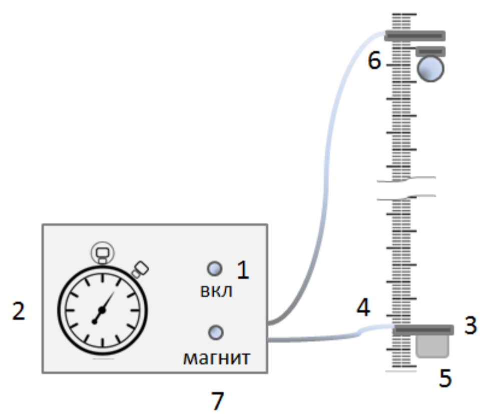


Рис. 18. Экспериментальная установка

Экспериментальная установка (рис. 18), состоящая из штатива с делениями, электромагнита, секундомера и мешочка-ловителя, позволяет измерять время падения шарика с высоты h. В начале необходимо подготовить прибор к работе: тумблер на секундомере (1) поставить в положение «вкл.», движением рычага (2) вверх поставить стрелку секундомера на «О», контактную заслонку (3) установить горизонтально с помощью ручки (4), мешочек-ловитель (5) установить под контактную заслонку, подвижной кронштейн с электромагнитом (6) установить на максимальной высоте, вставить вилку в розетку осветительной сети.

После проведенной подготовки работу на приборе проводить в следующем порядке:

1. Включить тумблер (7) с надписью «магнит» и подвести шарик к магниту.
2. Выключить тумблер (7), в этот момент исчезает магнитное поле, шарик падает, секундомер работает в течение времени падения шарика до заслонки (3). При ударе шарика контактная заслонка падает, разрывая цепь секундомера, и на его шкале можно прочесть время падения шарика с данной высоты.

Примечание. Вследствие намагничивания шарик не сразу отрывается при выключении электромагнита, и время будет измерено неверно. Чтобы устранить этот недостаток, надо шарик, притянутый к магниту, несколько раз повернуть в разные стороны, тогда его намагниченность в определенном направлении исчезнет. Намагниченность шарика можно уменьшить и другим способом: поместить небольшой клочок бумаги между шариком и сердечником электромагнита.

Падение шарика диаметром один-три сантиметра с небольших высот можно считать свободным, т.к. сопротивление воздуха очень мало и ускорение силы тяжести можно считать постоянным. Падение шарика будет происходить по закону $h = \frac{gt^2}{2}$.

Измеряя время падения шарика с разных высот (от 2 м до 1 м с интервалом 20 см, 3–5 раз с каждой высоты), определите g графическим способом.

Задания при планировании эксперимента

1. Какие величины следует внести в таблицу измерений? Подготовьте таблицу.

2. Какие меры предосторожности следует применять при выполнении работы?

3. Как зависит время падения шарика от высоты? В каких координатах эта зависимость может быть выражена прямой?

4. Сформулируйте гипотезу эксперимента.

Задания при выполнении работы

1. Укажите погрешность используемых приборов.

2. Проведите необходимые измерения и вычисления. Результаты измерений и вычислений занесите в таблицу.

3. Вычислите ускорение свободного падения графическим способом.

4. Укажите точность полученного результата.

Вопросы к защите работы

1. Что такое сила тяготения, сила тяжести и вес?

2. Чем обусловлена зависимость веса тела от широты места?

3. От чего зависит величина ускорения свободного падения?

4. Приведите примеры городов, в которых ускорение свободного падения будет примерно равно его значению в Челябинске.

5. Рассмотрите карту расположения космодромов (рис. 19). Объясните закономерность их расположения, назовите космодром, расположение которого неудачно с физической точки зрения.

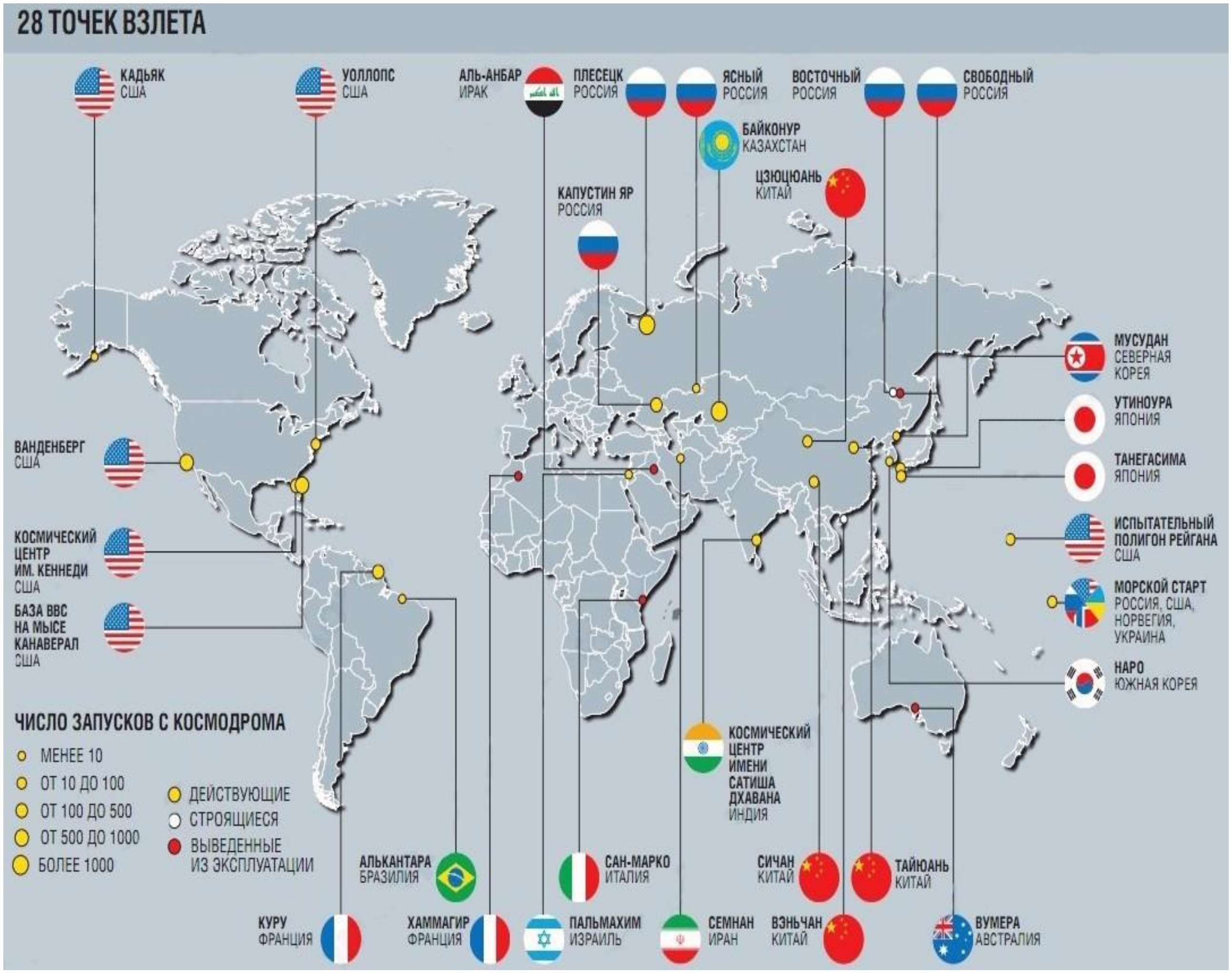


Рис. 19. Карта расположения космодромов

Лабораторная работа 9

ПРОВЕРКА ОСНОВНОГО ЗАКОНА ДИНАМИКИ ВРАЩАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

Цель работы:

1. Изучить зависимость углового ускорения от момента силы.
2. Изучить зависимость углового ускорения от момента инерции системы.

Задания при подготовке к работе

1. Что такое момент силы?

2. Что такое момент инерции?

3. Сформулируйте основной закон динамики вращательного движения. Как его можно проверить?

Метод измерения

Основным законом динамики является второй закон Ньютона, устанавливающий связь между силой, массой и ускорением тел (при поступательном движении):

$$\vec{F} = \frac{d(m\vec{v})}{dt}, \ \vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}.$$

При $m = const$ закон принимает вид:

$$\vec{F} = m\vec{a}\,. \qquad (1)$$

Таким образом, II закон Ньютона связывает кинематические характеристики (скорость, ускорение) с динамическими (силой и массой).

При вращательном движении роль кинематических и динамических характеристик играют другие величины.

Кинематические характеристики – угловое перемещение φ, угловая скорость ω и угловое ускорение ε:

$$\vec{\omega} = \frac{d\vec{\varphi}}{dt}, \ \vec{\varepsilon} = \frac{d\vec{\omega}}{dt}.$$

Вектор угловой скорости направлен вдоль оси вращения так, чтобы с конца вектора видеть вращение против часовой стрелки (определяется по правилу правой руки). При ускоренном вращении векторы угловой скорости и ускорения совпадают по направлению, при замедленном − противоположно направлены.

Связь между линейными и угловыми величинами устанавливают следующие формулы:

$$d\vec{s} = [d\vec{\varphi} \cdot \vec{r}], \qquad \vec{v} = [\vec{\omega} \cdot \vec{r}], \qquad \overrightarrow{a_\tau} = [\vec{\varepsilon} \cdot \vec{r}],$$

где $d\vec{s}$, $\vec{v}$, $\overrightarrow{a_\tau}$ − линейные перемещения, скорость и тангенциальное ускорение; $\vec{r}$ − радиус-вектор, проведенный от оси вращения к данной точке.

Динамические характеристики − момент силы M и момент инерции I.

Момент силы является причиной, вызывающей ускорение при вращении:

$$\vec{M} = \left[\vec{r} \cdot \vec{F}\right]. \qquad (2)$$

Момент инерции является мерой инертности при вращении тела (величина, аналогичная массе при поступательном движении).

Основной закон динамики вращательного движения (II закон Ньютона) связывает характеристики вращательного движения:

$$\vec{M} = \frac{[I\vec{\omega}]}{dt} \ , \qquad (3)$$

где $\vec{M}$ − суммарный момент внешних сил, действующих на тело; I − момент инерции тела относительно оси вращения; $\vec{\omega}$ − угловая скорость вращения тела.

Если $I = const$ (а это бывает всегда, когда при вращении не меняется положение оси вращения и не происходит перераспределения массы тела относительно оси вращения), то уравнение (3) принимает вид:

$$\vec{M} = I\vec{\varepsilon}. \qquad (4)$$

Это и есть основной закон динамики вращательного движения. Таким образом, целью работы является проверка формулы (4).

Приняв, что нить невесома, нерастяжима, считаем движение груза равноускоренным. Измерив время движения груза и пройденный путь *h,* рассчитаем ускорение груза:

$$a = 2h/t^2 . \qquad (5)$$

Угловое ускорение маятника ε выразим через линейное ускорение и радиус шкива r:

$$\varepsilon = \frac{a}{r} = \frac{2\,h}{r\,t^2} \ . \qquad (6)$$

Силу натяжения нити T можно определить, применив к движению груза массой m закон Ньютона (пренебрегая при этом сопротивлением воздуха): $T = m(g - a) \cong mg$, так как обычно $a \ll g$.

Таким образом, измерив для груза массой m время t прохождения им расстояния h, можно рассчитать угловое ускорение $\mathscr{E}$ (формула 6) маятника и определить момент силы, действующий на маятник:

$$M = Tr = mgr. \qquad (7)$$

При вращении маятника на него действует также тормозящий момент сил трения $M_{тр}$, и поэтому закон динамики принимает вид

$$I\varepsilon = M - M_{тр}. \qquad (8)$$

Это уравнение позволяет найти момент инерции блока I динамическим методом, измерив ряд величин ε и M. Для более точного определения величины I в опыте получите зависимость $\varepsilon = f(M)$, линейный характер которой (при $M_{тр} = \text{const}$) позволяет рассчитать среднее значение момента инерции I по угловому коэффициенту эмпирической прямой.

Описание экспериментальной установки

Основной частью установки является крестообразный маятник, который может вращаться с малым трением вокруг оси О (см. рис. 20).

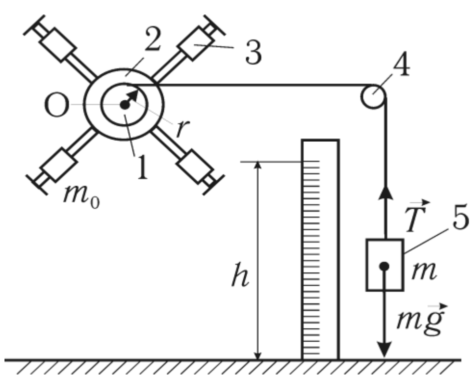


Рис. 20. Схема установки с маятником Обербека

По стержням крестовины могут перемещаться подвижные цилиндры (3) массой $m_о$. На одной оси с крестовиной насажены шкивы (1) и (2) разного радиуса r. К концу нити, намотанной на один из шкивов и перекинутой через невесомый блок (4), прикрепляется груз (5) массой m, приводящий маятник во вращательное движение. Время прохождения грузом расстояния h измеряют секундомером. Маятник в исходном положении удерживается электромагнитом, при нажатии клавиши «Пуск» секундомера электромагнит отключается, груз начинает двигаться и одновременно включается секундомер. Счёт времени заканчивается при достижении грузом нижнего положения. Для того, чтобы секундомер сработал, необходимо установке с помощью винтов в основании платформы придать такое положение, при котором груз опускался бы точно в отмеченный круг. В этот круг вмонтирован датчик, выключающий секундомер.

Расстояние h отмечается по линейке, установленной в верхней части установки, на которой указывается расстояние груза в начальном положении от основания установки.

При отсутствии грузов (3) на стержнях прибор имеет собственный момент инерции I_0. Если на стержнях прибора находятся грузы, то момент инерции прибора будет: $I = I_0 + I_C + n \cdot m_0 l^2$, где n – число грузов, l − расстояние грузов от оси вращения; m_0 − масса одного груза; I_C − момент инерции грузов относительно оси, проходящей через их центры масс; I_0 − момент инерции крестовины без грузов. Однако $I_C \ll I_0$и $n \cdot m_0 l^2$, поэтому в работе будем приближенно считать:

$$I = I_0 + n \cdot m_0 l^2. \tag{9}$$

Задания при планировании эксперимента

1. Как можно проверить зависимость $\varepsilon = f(M)$? Какое условие должно при этом выполняться? Как изменять M? Как определить ε?

2. Как проверить зависимость $\varepsilon = f(I)$? Какое условие при этом надо соблюдать? Как менять I? Как определить I_0?

3. Какие величины нужно вносить в таблицы 1 и 2 (для заданий 1 и 2)?

Задания при выполнении работы

Задание 1. Изучение закона вращения маятника.

1. Определите массу грузов, установите центры подвижных цилиндров m_0 на одинаковом расстоянии l от оси вращения и измерьте радиусы шкивов r_1 и r_2. Результаты запишите в табл. 1.

Таблица 1

h =					
r =	№	m	t	М, Н·м	α, с$^{-2}$
r_1 =	1 2 3 4 5				
r_2 =	6 7 8 9 10				
Координаты средней точки					

2. Прикрепите к нити один из грузов m. Вращая маятник, намотайте нить на малый шкив r_1 в *один слой* и включите электромагнит красной кнопкой, расположенной в верхней части установки. Запишите расстояние h, проходимое грузом при падении. Убедитесь, что нить и груз во время движения не задевают неподвижные части установки или другие предметы. Устраните качание груза и нажмите кнопку «*Пуск*» секундомера. Запишите время t движения груза до нижней точки.

3. С тем же шкивом, увеличивая массу груза m (не менее 4-х раз), запишите время t движения груза на пути h. Все результаты по мере их получения записывайте в табл. 1.

4. Аналогичные измерения проведите, используя шкив радиусом r_2.

5. Вычислите значения ε и M в каждом опыте по формулам.

6. Изобразите графически зависимость углового ускорения ε от момента силы M, *нанеся точки для обоих шкивов на один график*.

7. По графику определите среднее значение момента инерции маятника $I = \Delta M/\Delta\varepsilon$, рассчитав угловой коэффициент прямой.

8. По графику определите момент сил трения, сравните его с моментами, создаваемыми грузами, и сделайте вывод.

9. Рассчитайте относительную и абсолютную погрешности момента инерции.

Задание 2. Измерение динамическим методом момента инерции крестовины маятника и проверка теоремы Штейнера.

1. Закрепите подвижные цилиндры на максимальном и одинаковом расстоянии l от оси вращения. Прикрепите к нити груз массой m. Выберите для эксперимента один шкив, измерьте его *радиус* r и запишите в табл. 2 значения m, r и h.

Таблица 2

$h =$ *м*, $m =$ *кг*, $r =$				
№	l	t	l^2	I, *кг м*^{2}
1				
2				
…				
7				
$\bar{l}$		$\bar{I}$	$\bar{l}^2$	$\bar{I}$

2. Вращая маятник, намотайте нить на шкив *в один слой* и измерьте время движения t (см. п. 3 задания 1).

3. Проведите ещё 6 опытов *с тем же грузом* m, уменьшая всякий раз на 1,5–2 см расстояние цилиндров l от оси вращения. Результаты измерений l и t вносите в табл. 2.

4. Вычислите для каждого опыта величины l^2 и момент инерции маятника по формуле, полученной с учётом выражений (7), (8):

$$I = \frac{M}{\varepsilon} = mr^2\left(\frac{gt^2}{2h} - 1\right). \qquad (10)$$

5. Постройте график зависимости момента инерции маятника I от l^2. Сделайте вывод о характере полученной зависимости $I = f(l^2)$ с учётом того, что момент инерции маятника, у которого цилиндры приняты за материальные точки,

$$I = I_0 + 4m_0 l^2. \qquad (11)$$

6. Определите с помощью графика (динамическим методом) момент инерции крестовины $I_{кр}$, которой, согласно (11), равен параметру b линейной зависимости $I = f(l^2)$.

7. Рассчитайте массу подвешенных грузов m_o.

8. Сделайте выводы.

Вопросы к защите

1. Что такое угловая скорость, угловое ускорение, момент силы? Как они направлены?

2. От чего зависят: а) угловое ускорение маятника, б) момент инерции маятника, в) момент силы, действующий на маятник?

3. Как по результатам задания 1 определить момент силы трения в подшипниках прибора?

4. Покажите на чертеже направление момента силы, создающей вращение прибора, и момента силы трения.

5. Считая грузы m_0 дисками для одной из строк таблицы 2, покажите, что I_c мало по сравнению с I_0 и $4m_0l^2$, т.е., что расчет момента инерции системы I по формуле (9) дает небольшую ошибку.

Лабораторная работа 10

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ИНЕРЦИИ ТЕЛА. ПРОВЕРКА ТЕОРЕМЫ ШТЕЙНЕРА

Цель работы: определить момент инерции тел правильной формы и проверить зависимость величины момента инерции от величины смещения.

Оборудование: ЛКМ–6, набор грузов различной формы, штангенциркуль.

Задания при планировании работы

1. Что такое момент инерции тела? Запишите формулу момента инерции материальной точки.
2. Запишите формулы для определения момента инерции тел различной формы (шар, диск, кольцо, цилиндр, стержень).
3. Сформулируйте и запишите теорему Штейнера.
4. Запишите основное уравнение динамики вращательного движения. Как можно определить величины, входящие в это уравнение?
5. Что такое угловая скорость, угловое ускорение, момент силы? Запишите формулы, связывающие эти величины. Как направлены эти вектора?

Описание установки

Основными элементами ЛКМ-6 являются (рис. 21): предметный столик (4), положение которого фиксируется тормозом (1). Под действием груза (5) столик может вращаться. При этом момент вращающей силы будет зависеть от ее плеча, которое можно менять, наматывая нить на шкив (2 или 3).

Стол неподвижен, когда щель диска стола находится в зазоре фотодатчика (рис. 21), о чем свидетельствует свечение индикатора. На один из шкивов стола намотана нить, создающая момент сил относительно оси стола.

Измеряется время поворота стола на один или два оборота. Запуск счета времени и запись показаний производится при выходе щели диска из зазора фотодатчика, т.е. на переходе сигнала датчика с нулевого на положительное значение (рис. 22).

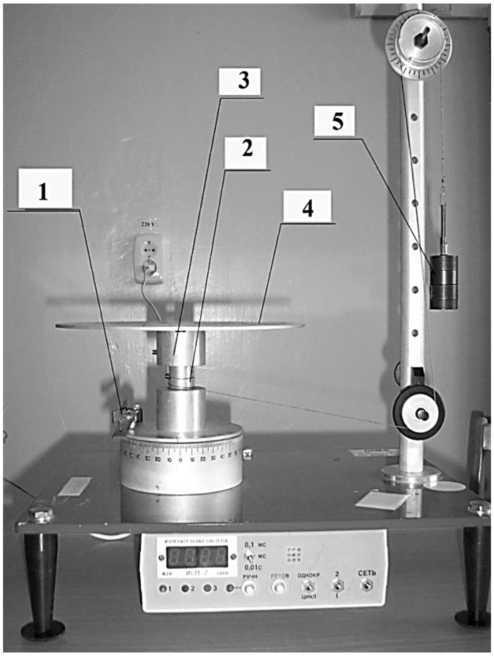


Рис. 21. Установка ЛКМ-6

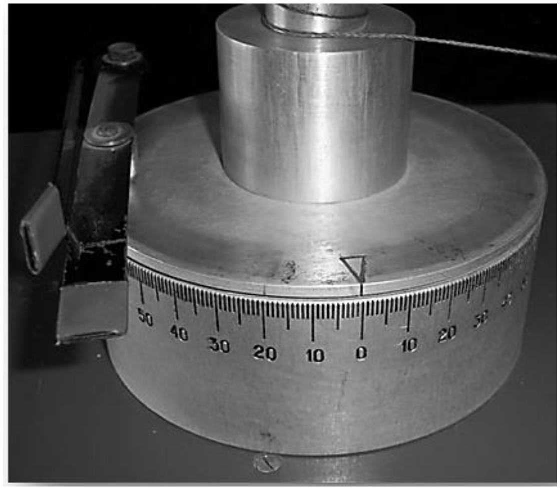


Рис. 22. Устройство отсчета времени

После отпускания тормоза стол начинает вращаться. При положении «1» ручки тумблера 2 (рис. 23) таймер (5) высвечивает время поворота стола на один оборот, т.е. на угол $\varphi = 2\pi$, или на два оборота, т.е. на угол $\varphi = 4\pi$ при положении «2» ручки того же тумблера.

Рис. 23. Измерительная система ЛКМ-6

Угловая скорость

$$\omega = \frac{\varphi}{t}. \qquad (1)$$

Угловое ускорение

$$\varepsilon = \frac{\varphi^2}{t}. \qquad (2)$$

Угловая скорость в конце исследуемого движения

$$\omega = \frac{2\varphi}{t}. \qquad (3)$$

Как правило, стол продолжает вращаться. Для удержания на дисплее первого отсчета следует использовать режим «ОДНОКР» тумблера (3) (рис. 23). Перед началом измерений нужно нажать кнопку «ГОТОВ» (4, рис. 23), после чего показания секундомера обнуляются.

На нити, намотанной на шкив радиусом r стола и перекинутой через ролики большой или малой стойки, висит груз массой m. Момент сил, действующих на стол

$$M \approx mgr. \qquad (4)$$

Стол приводят во вращение с помощью груза и нити, намотанной на шкив стола. Согласно формуле (2) определяют угловое ускорение стола. Момент инерции

$$I = \frac{M}{\varepsilon} = \frac{mgrt^2}{2\varphi}. \qquad (5)$$

Метод измерения

Часть 1. Определение момента инерции

Измерьте диаметр используемого вами шкива с помощью штангенциркуля.

Соберите установку, на шкив намотайте один конец нитки, перекиньте через ролики, на втором конце нити – крючок, на который нужно закрепить грузики, массу которых необходимо записать. Установите щель диска стола в зазор фотодатчика, установите тормоз. Включите установку в сеть, сбросьте значения таймера на ноль.

Отпустите тормоз стола. Запишите время, высветившееся на индикаторе таймера. Вычислите момент инерции стола по формуле (5). Все измерения производить не менее пяти раз. Рассчитайте среднее значение момента инерции стола, занесите данные в таблицу.

После этого в центр стола установите тело (диск, полусферу, кольцо или цилиндр). Повторите измерения. Таким образом, будет определен момент инерции стола с установленным на него телом.

Момент инерции тела можно определить по формуле

$$I_{тела} = I_{изм} - I_{стола}. \qquad (6)$$

Сравните полученные результаты с теоретическими, рассчитанными по формуле момента инерции твердого тела при известных массе, размерах и форме тела.

Таблица 1

r, м =			*φ, рад =*		
№ п/п	*m, кг*	*t, с*	$I_{изм.}$, *кг·м²*	$I_{тела\ эксп}$, *кг·м²*	$I_{тела\ теор}$, *кг·м²*

Часть 2. Проверка теоремы Штейнера

Возьмите два одинаковых цилиндра. Установите их друг на друга в центре стола. Проведите измерения момента инерции стола вместе с телом в таком положении (как в части 1), запишите измеренные и расчетные данные в таблицу 2, которую составьте сами.

Сместите цилиндры симметрично относительно центра стола на несколько отверстий, учитывая, что расстояние между центрами отверстий 2 см. Определите экспериментально момент инерции цилиндров. Все измерения проводите не менее пяти раз. Рассчитайте по формуле Штейнера величину момента инерции цилиндров в установленном вами положении, сравните с экспериментальным значением.

Вопросы к защите

1. Какова роль момента инерции во вращательном движении?
2. Почему в формуле (4) приблизительное равенство?
3. Определите, чему равны плечи сил, приведенных на рис. 24.

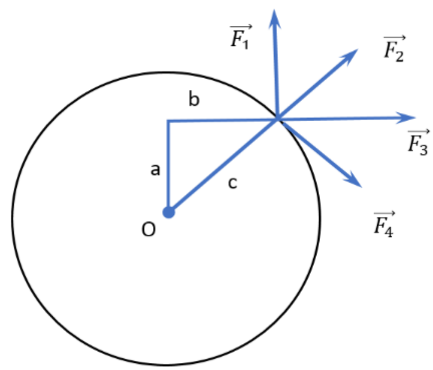


Рис. 24. Иллюстрация к заданию 3

4. Четыре маленьких шарика одинаковой массы, жестко закрепленные невесомыми стержнями, образуют квадрат. Найдите отношение моментов инерции системы, если ось вращения совпадает в первом случае со стороной квадрата и с его диагональю – во втором.

5. Объясните, как меняют фигуристы скорость вращения. Как максимально ускорить вращение? Что необходимо сделать, чтобы остановиться?

Лабораторная работа 11

ИЗУЧЕНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ИЗГИБА

Цель работы:

1. Экспериментально изучить зависимость стрелы прогиба стержня от силы, действующей на него, сравнить эту зависимость с теоретической.

2. Определить модуль Юнга и сравнить его значение с табличным.

Задания при планировании работы

Используя литературу и конспекты лекций, изучите теоретический материал и ответьте на вопросы:

1. Что называется деформацией? Какие виды деформаций вы знаете?

2. Объясните возникновение упругих сил в деформированном теле.

3. Охарактеризуйте деформацию растяжения (сжатия) по следующей схеме:

а) Как направлены силы, вызывающие продольную деформацию растяжения (сжатия)?

б) Как изменяются линейные размеры тел при деформации растяжения (сжатия)?

в) Какой величиной характеризуется деформация растяжения?

4. Охарактеризуйте по той же схеме деформацию изгиба.

5. Что называется напряжением? Какое напряжение называется нормальным? касательным?

6. Какую зависимость и между какими величинами устанавливает закон Гука? Представьте эту зависимость графиком.

7. Что называется модулем Юнга? От чего зависит модуль Юнга?

Решите задачи

1. Концы стальной балки длиной 0,6 м, шириной 15 мм и толщиной 6 мм положены на две опоры. Под действием силы, приложенной к середине балки, она прогнулась так, что стрела прогиба оказалась равной 3 мм. Как велика сила, действующая на балку? Как изменится стрела прогиба, если сила увеличится в 2 раза? Уменьшится в 3 раза?

2. Стержень, длина которого 40 см, ширина 10 мм, толщина 4 мм, положен на две опоры. На середине стержня положен груз, масса которого 2 кг. Стрела прогиба стержня оказалась равной 5 мм. Из какого материала сделан стержень?

Описание экспериментальной установки

Установка (рис. 25) состоит из прямоугольного стержня, положенного концами на две опоры. Вдоль стержня может перемещаться хомутик, к которому подвешивается платформа с грузами. Стрелу прогиба стержня можно наблюдать в микроскоп, снабженный окулярным микрометром.

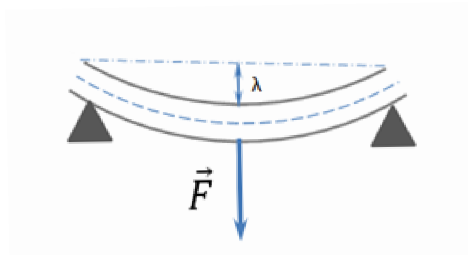


Рис. 25. Схема деформации изгиба

Метод измерения

Если на середине стержня, симметрично положенного на две опоры, подвесить груз, то стержень прогнется. Связь между стрелой прогиба и силой, вызывающей деформацию стержня, можно выразить формулой

$$\lambda = (l^3/4ab^3E)\cdot F \tag{1}$$

где l – длина стержня; a – его ширина; b – толщина стержня; E – модуль упругости материала стержня.

Вывод этой формулы вследствие её сложности здесь не приводится.

В данной работе требуется экспериментально определить зависимость стрелы прогиба стержня λ от величины силы F, действующей на стержень, и определить модуль Юнга. Для решения этой задачи нужно найти независимые друг от друга способы измерения λ и F.

Задания при планировании эксперимента

1. Ознакомьтесь с экспериментальной установкой и методом измерения, ответьте на вопросы:

а) какую зависимость между F и λ устанавливает уравнение (1)? Ответ объясните;

б) можно ли зависимость, представленную уравнением (1), на графике выразить в виде прямой линии? Если да, то как это можно сделать и чему равен угловой коэффициент этой прямой?

2. Для того чтобы установить, есть ли зависимость между двумя величинами, нужно изменять одну из этих величин и, измеряя каждый раз другую, посмотреть, изменяется ли она при изменении первой.

Ответьте на вопросы

а) какую величину (λ или F) мы должны изменять сами, а какую величину и как нужно измерять каждый раз при изменении первой?

б) как наглядно можно представить результаты измерений для того, чтобы обнаружить определенную зависимость между этими величинами?

в) каким образом можно определить модуль Юнга в этой работе? Надо ли провести еще какие-либо измерения для этой цели? Если да, то какие величины и каким образом надо при этом измерить?

Выведите формулу для расчета погрешности «S_E» и «Δ».

Задания при выполнении работы в лаборатории

1. Ознакомьтесь с установкой в лаборатории. Убедитесь в ее исправности.

2. Проведите необходимые прямые измерения и запишите их в таблицу.

3. Представьте результаты измерений в виде графика $\lambda = f(F)$.

4. Определите графически модуль Юнга E. Запишите ответ для E в окончательном виде.

5. Анализируя результаты работы, сделайте вывод.

Вопросы к защите работы

1. Почему из деформации изгиба можно определить модуль Юнга?

2. Приведите примеры проявления деформации изгиба в природе и в технике.

3. Почему многие кости, стебли растений трубчатые? Как устроены трубчатые кости птиц?

Лабораторная работа 12

ИЗУЧЕНИЕ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

Цель работы:

1. Экспериментально изучить зависимость периода колебаний математического маятника от его длины и сравнить с теоретической.

2. Определить ускорение свободного падения и сравнить полученное значение с теоретическим.

3. Изучить зависимость колебаний пружинного маятника от массы груза и определить коэффициент жесткости пружины.

Задания при планировании работы

1. Что называют колебаниями? Какие колебания называют свободными; гармоническими?

2. Какими величинами характеризуются гармонические колебания?

3. Какие величины, характеризующие незатухающее колебательное движение, изменяются с течением времени? Запишите уравнения, выражающие зависимость этих величин от времени.

4. Что называют математическим маятником? Период колебаний математического маятника.

5. Зависит ли период колебаний математического маятника от его массы и амплитуды колебаний?

6. Что называют пружинным маятником? Период колебаний пружинного маятника.

Решите задачи

1. Один маятник совершил 180 колебаний за 3 минуты, а другой 240 колебаний за 4 минуты. Период колебаний какого маятника больше?

2. Длину нити математического маятника увеличили в 2 раза. Как изменится период колебаний?

3. Груз 100 г заменили грузом 400 г. Как изменится период колебаний пружинного маятника?

Описание экспериментальной установки

Математическим маятником может считаться небольшой шарик, подвешенный на тонкой нити, длину которой можно изменять. Диаметр шарика должен быть много меньше длины нити.

В данной работе используется установка, состоящая из опоры с размещенной на ней мерной линейкой, нити длиной более 1,5 метров и закрепленного на ее конце шарика. Отклонив нить от вертикали на угол не более 5°, приводят маятник в колебательное движение.

Метод измерения

Зависимость периода колебаний математического маятника от его длины выражена формулой

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}, \qquad (1)$$

$$T = C\sqrt{l}. \qquad (2)$$

Изменяя длину нити маятника и измеряя период колебаний, можно изучить зависимость периода колебаний математического маятника от длины нити. Если зависимость (2) спрямить и изобразить графически прямой, то по этому графику можно определить (по тангенсу угла наклона) константу C и ускорение свободного падения g.

Аналогичный метод используется при исследовании периода колебаний пружинного маятника от массы груза. По графику можно определить величину жесткости пружины. Далее следует сравнить полученное значение со значением жесткости, полученным для этой пружины по закону Гука.

Задания при планировании эксперимента

1. Ознакомившись с экспериментальной установкой и методом измерения, ответьте на вопросы:

а) при каких условиях шарик на нити можно принять за математический маятник?

б) что принимается за длину такого маятника?

в) почему отклонять нить о вертикали надо на угол не более 5°?

г) выражает ли уравнение (2) прямо пропорциональную зависимость между величинами? Если да, то что при этом надо откладывать по оси абсцисс, а что по оси ординат? Чему равен угловой коэффициент этой прямой?

2. Для того чтобы наметить порядок проведения измерений, ответьте на вопросы:

а) как опытным путем можно обнаружить зависимость периода колебаний математического маятника от его длины? Какие величины при этом нужно измерить?

б) каким образом можно измерить длину маятника с наименьшей ошибкой?

в) как измерить период колебаний с наименьшей ошибкой? Достаточно ли при этом измерить время одного колебания? Является ли измерение периода колебаний математического маятника непосредственным измерением? Если нет, то какую формулу при этом нужно использовать?

г) какие величины в этой работе можно измерить непосредственно, а какие косвенным методом и по каким формулам?

4. Сформулируйте гипотезу эксперимента.

5. Начертите таблицу для записи результатов измерений.

Задания при выполнении работы в лаборатории

1. Подберите приборы для работы. Соберите установку.

2. Запишите технические характеристики приборов в таблицу.

3. Проведите необходимые измерения и вычисления. Результаты измерений запишите в таблицу.

4. Представьте зависимость между периодом колебаний математического маятника и его длиной графиком. Используя полученный график, определите ускорение свободного падения.

5. Оцените точность полученного результата.

6. Запланируйте и проведите эксперимент по исследованию зависимости периода колебаний пружинного маятника от его массы, определите коэффициент жесткости пружины.

7. Анализируя результаты работы, сделайте вывод.

Вопросы к защите работы

1. Совпадает ли экспериментальная зависимость периода колебаний математического маятника от его длины с теоретической?

2. Всегда ли ускорение свободного падения g можно считать постоянной величиной? Ответ объясните.

3. Как экспериментально определить, есть ли зависимость периода колебаний математического маятника от его массы?

4. Можно ли такую работу включить в число работ физического практикума в школе? В каком классе это можно сделать?

5. От каких величин зависит жесткость пружины?

Лабораторная работа 13

ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСКОРЕНИЯ СВОБОДНОГО ПАДЕНИЯ ПРИ ПОМОЩИ ФИЗИЧЕСКОГО МАЯТНИКА

Цель работы:

1. Ознакомиться с физическим маятником.

2. Измерить ускорение свободного падения и сравнить его с табличным значением.

Задания при подготовке к работе

1. Что такое физический маятник?

2. Что такое приведенная длина физического маятника?

3. Будет ли «работать» физический маятник, если ось вращения проходит через его центр масс?

Метод измерения

Физическим маятником называют любое твердое тело, колеблющееся вокруг оси, не проходящей через центр масс (рис. 26).

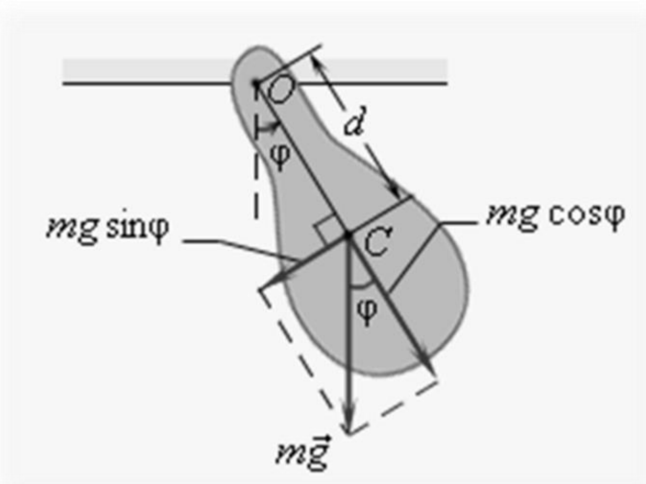


Рис. 26. Физический маятник

Период колебаний физического маятника в поле силы тяжести:

$$\boldsymbol{T = 2\pi\sqrt{\frac{I}{mga}}}, \qquad (1)$$

где I – момент инерции маятника относительно оси вращения; m – масса маятника; g – ускорение свободного падения; a – расстояние от оси вращения до центра масс маятника.

Период колебаний математического маятника определяется формулой

$$\boldsymbol{T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}}.$$

Если обозначить $l_n = \frac{I}{ma}$, то формула (1) примет такой же вид. Величину l_n называют приведенной длиной физического маятника, это длина такого математического маятника, период колебаний которого равен периоду колебаний данного физического маятника. При этом всегда $l_n > a$. Покажем это:

$$l_n = \frac{I}{ma} = \frac{I_c + ma^2}{ma} = \frac{I_c}{ma} + a,$$

где I_c − момент инерции маятника относительно оси, проходящей через центр масс. Эта величина неизвестна и измерить ее для произвольного физического маятника непросто, поэтому непосредственно из формулы (1) нельзя найти g. Для исключения I_c используют так называемый оборотный маятник (рис. 27).

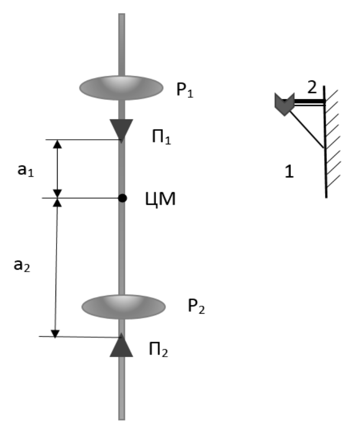


Рис. 27. Оборотный физический маятник

Это стержень с двумя грузами, один из которых может перемещаться. На стержне жестко закреплены две призмы ($П_1$ и $П_2$), относительно которых маятник может колебаться.

При колебании маятника относительно оси, проходящей через призму $П_1$, его период определяется по формуле:

$$\boldsymbol{T_1 = 2\pi\sqrt{\frac{I_1+ma_1^2}{mga_1}}.}$$

Аналогично относительно призмы $П_2$:

$$\boldsymbol{T_2 = 2\pi\sqrt{\frac{I_1+ma_2^2}{mga_2}}.}$$

Решая систему из этих двух уравнений, получим:

$$g = \frac{4\pi^2 d(a_1-a_2)}{T_1^2 a_1 - T_2^2 a_2}\ . \qquad (2)$$

Здесь a_1 и a_2 – расстояние от призм $П_1$ и$П_2$ до центра масс; d – расстояние между ребрами призм.

Описание экспериментальной установки

Установка состоит из маятника (рис. 27), который может подвешиваться на стойке (2) на призме $П_1$ или $П_2$. Для определения расстояний a_1 и a_2 маятник надо снять со стойки (не передвигая грузов), поместить его на трехгранную опору, найти центр тяжести, отметить его мелом и измерить расстояния от призм $П_1$ и $П_2$ до центра тяжести.

Для определения приведенной длины физического маятника рядом с ним установлен математический маятник, длину которого можно легко менять. Меняя длину математического маятника, уравнять периоды колебаний обоих маятников и измерить приведенную длину l_n.

Задания при планировании эксперимента

1. Подготовьте таблицу измерений.
2. Выведите формулу (2).
3. Сформулируйте гипотезу эксперимента.

4. Какие величины дают наибольший вклад в ошибку и их следует измерять с минимально возможной абсолютной погрешностью?

Задания при выполнении работы

1. Используя (2), определите ускорение свободного падения g. Периоды колебаний T_1 и T_2 относительно призм $П_1$ и $П_2$ нужно определять по формуле $T = t/n$, где t – время, за которое совершается n колебаний (n = 20–30).

Амплитуда колебаний маятника при измерениях не должна превышать 15–20 см (т.к. приведенные формулы справедливы для колебаний с малой амплитудой).

2. Измените произвольно расстояние между грузами и повторите опыт. Для этого потребуется передвинуть на 3–4 см подвижный груз.

3. Вычислите погрешность измерения и запишите окончательный результат.

4. Определите приведенную длину физического маятника.

Вопросы к защите работы

1. От чего зависит ускорение свободного падения?

2. Для чего измеряют ускорение свободного падения?

3. «Ускорение свободного падения одинаково для любых тел в данной точке» (Г. Галилей). Тогда почему тела падают с разными скоростями?

Лабораторная работа 14

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАТУХАЮЩИХ КОЛЕБАНИЙ

Цель работы: **э**кспериментально определить зависимость коэффициента затухания от формы тела.

Задания при подготовке к работе

Ответьте на вопросы

1. Какие колебания называют затухающими?
2. Запишите уравнение затухающих колебаний.
3. Какими параметрами характеризуются затухающие колебания?
4. Как связана частота затухающих колебаний с частотой собственных колебаний? Что такое апериодическое движение, приведите примеры.

Метод измерения

В гармоническом колебании амплитуда не зависит от времени. Такие колебания называются незатухающими. Это идеализированный случай, не учитывающий силы сопротивления. Любое реальное колебание происходит с постепенным расходованием энергии движения на работу против сил трения. При этом амплитуда колебаний убывает. Происходит затухание колебаний (рис. 28).

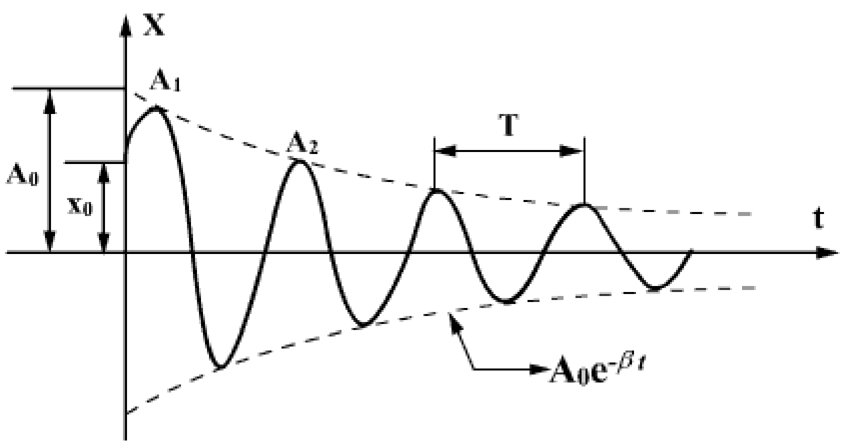


Рис. 28. График зависимости координаты от времени для затухающих колебаний

Периодом затухающих колебаний называется время, в течение которого система дважды проходит положение равновесия в одном и том же направлении.

Амплитудой затухающих колебаний называется наибольшее смещение в пределах одного периода. Закон убывания амплитуды затухающих колебаний зависит от характера сил сопротивления.

Если сила сопротивления среды пропорциональна первой степени скорости,

$$F_c = -rv,$$

то колебательное движение описывается уравнением:

$$x = A_0 e^{-\beta t} cos(w_1 t + \varphi_0), \qquad (1)$$

где $A = A_0 e^{-\beta t}$ – закон убывания амплитуды; A_0 – начальная амплитуда; e = 2,718 – основание натурального логарифма; x – отклонение тела от положения равновесия (смещение); ω_1 − круговая частота затухающих колебаний.

Последняя связана с частотой собственных колебаний соотношением

$$\omega_1 = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}\ , \qquad (2)$$

где β – коэффициент затухания.

При $\beta = \omega_0$, $\omega_1 = 0$, т.е. колебаний нет, колебательное движение переходит в так называемое апериодическое движение (тело от крайнего положения постепенно приходит к положению равновесия, в течение четверти периода вся энергия расходуется на преодоление сил сопротивления). Это явление используется в демпферах, устройствах для гашения колебаний (колебания стрелки весов, стрелки электроизмерительных приборов, в автомобильных амортизаторах и т.д.). Наиболее часто на практике используется случай $\beta \ll \omega_0$, тогда $\omega_1 \approx \omega_0$. Коэффициент затухания определяется согласно

$$\beta = \frac{r}{2m},$$

где r – коэффициент силы трения, зависящий от плотности среды и формы тела; m – масса тела.

В работе исследуется зависимость r от формы тела, при этом масса тела (маятника) должна быть постоянной. Количественно затухание характеризуется логарифмическим декрементом затухания δ (3), который равен натуральному логарифму отношения двух последовательных амплитуд, разделенных временем, равным периоду колебания T.

$$\delta = ln\frac{A_n}{A_{n+1}}. \tag{3}$$

Следовательно, $\delta = ln\frac{A_n}{A_{n+1}} = ln\frac{A_0e^{-\beta t}}{A_0e^{-\beta(t+T)}} = \ln e^{\beta t} = \beta T$,

$$\delta = \beta T. \tag{4}$$

Из (4) можно определить β − коэффициент затухания, зная T и δ, которые легко определяются из опыта.

Описание экспериментальной установки

Установка представляет собой маятник на длинном стержне, на который может надеваться сфера. При изучении колебаний маятника диска на него надевается металлическое кольцо с целью соблюдения условия постоянства массы. Шкала с делениями служит для измерения амплитуды. Период колебаний определяется с помощью секундомера.

Задания при планировании эксперимента

1. Как измерить период колебаний с минимальной погрешностью?
2. Как соотносятся между собой массы металлического кольца и сферы?
3. Какие величины следует внести в таблицу измерений?
4. Как экспериментально определить коэффициент затухания?
5. Сформулируйте гипотезу эксперимента.

Задания при выполнении работы

1. Определите коэффициент затухания маятника-диска. Для этого на диск следует надеть металлическое кольцо. Отклонить маятник на 30−40 см и отпустить, определить период T маятника, измеряя время 10 полных колебаний. Затем, отклонив маятник на 30−40 см и отпустив его, измерить ряд последователь-

ных амплитуд с одной стороны (A_1, A_2, A_3, A_4, A_5). По формуле (3) найти несколько значений β и взять среднее. По известным β и T определить коэффициент затухания. Построить график зависимости $x = f(t)$.

2. Определить коэффициент затухания маятника-сферы. При этом металлическое кольцо надо снять, а на диске закрепить две полусферы замком. Опыт повторить в той же последовательности, что и с диском. Построить график $x = f(t)$, сравнить его с графиком для диска.

Вопросы к защите работы

1. От чего зависит коэффициент затухания?

2. Как влияет форма тела на коэффициент затухания (по результатам вашего исследования)? Почему?

3. Как можно было бы определить зависимость коэффициента затухания от массы?

4. Какие тела имеют наиболее обтекаемую форму?

Лабораторная работа 15

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ВЯЗКОСТИ ЖИДКОСТИ МЕТОДОМ СТОКСА

Цель работы:

1. Ознакомиться с одним из методов определения коэффициента вязкости (методом Стокса).

2. Определить вязкость жидкости и сравнить полученное значение с табличным.

Задания по подготовке к работе

1. Какие опытные факты свидетельствуют о наличии сил внутреннего трения в жидкостях (или газах).

2. Что такое коэффициент вязкости? Единицы измерения в СИ. От чего зависит коэффициент вязкости?

3. От каких величин и как зависит сила сопротивления при движении тела в жидкости? Запишите формулу Стокса, поясните смысл всех величин, входящих в него.

4. Сформулируйте закон Архимеда. Запишите формулу для расчета выталкивающей силы.

Решите задачи

1. Определите выталкивающую силу, действующую на стальной шарик, опущенный в глицерин. Диаметр шарика 4 мм.

2. Стальной шарик диаметром 3 мм опускают в высокий вертикальный сосуд с глицерином. Определите вязкость глицерина, если, падая равномерно, шарик за 15 с прошел расстояние 35 см.

Описание экспериментальной установки

Для определения коэффициента вязкости берут высокий цилиндрический сосуд, наполненный жидкостью, и небольшой шарик. Диаметр шарика значительно меньше диаметра сосуда. На цилиндрической поверхности сосуда имеется шкала с миллиметровыми делениями. Шарик подводится к поверхности жидкости и опускается в нее вблизи оси цилиндра. Перед опусканием его надо покатать в пальцах, слегка смоченных в исследуемой жидкости, чтобы на его поверхности не образовывались пузырьки воздуха.

Метод измерения

Так как плотность шарика больше плотности жидкости, то он будет опускаться вниз. При этом на него будут действовать силы:

а) сила тяжести, направленная вертикально вниз;

б) выталкивающая сила, направленная вертикально вверх;

в) сила сопротивления движению − сила Стокса, направленная противоположно движению:

$$F_c = -6\pi r\eta\vec{v}.$$

Изобразите эти силы на рисунке.

В начале движения шарик движется ускоренно, но с ростом скорости увеличивается сила сопротивления движению (F_c). При этом ускорение шарика уменьшается, а скорость его все равно растет. Очевидно, может наступить момент, когда ускорение шарика окажется равным нулю и шарик будет двигаться равномерно:

$$m\vec{g} + \overrightarrow{F_A} + \overrightarrow{F_C} = 0. \qquad (1)$$

Запишите равенство (1) в скалярном виде для этого случая. Чтобы получить формулу для расчета коэффициента вязкости, надо в последнее записанное вами равенство подставить формулы для mg, Fc, F_a, массу шарика выразить через его плотность и объем, а объем шарика выразить через его линейный размер.

Предлагается самостоятельно проделать указанные выше операции и получить формулу для определения коэффициента вязкости. В правой части этой формулы должны стоять величины, которые можно непосредственно измерить на опыте.

Задания при планировании эксперимента

1. Ознакомьтесь с экспериментальной установкой, методом измерения и ответьте на вопросы:

а) почему шарик надо опускать в жидкость у ее поверхности вблизи оси цилиндра?

б) почему нужно исключить образование воздушных пузырьков на поверхности шарика при погружении его в жидкость?

в) зачем на стенках цилиндра с жидкостью нанесена миллиметровая шкала?

г) почему отсчет расстояния и времени начинают не у самой поверхности жидкости?

2. Сформулируйте цель и гипотезу эксперимента.

3. Анализируя рабочую формулу, ответьте на вопросы:

а) какие прямые измерения необходимо провести в этой работе?

б) с помощью каких приборов можно сделать эти измерения?

4. Выведите формулу для расчета погрешности.

Задания при выполнении работы в лаборатории

1. Ознакомьтесь с экспериментальной установкой в лаборатории.

2. Подберите приборы для работы. Определите технические характеристики.

3. Проведите прямые измерения с учетом возможных погрешностей не менее 5 раз. Результаты измерений запишите в таблицу. Проведите вычисления η, S_η и Δ. Ответ запишите в окончательном виде. Сравните полученный результат с табличным. Сделайте вывод.

Вопросы к защите работы

1. Будет ли изменяться коэффициент вязкости исследуемой жидкости, если брать шарики разного диаметра? Ответ обоснуйте.

2. Как можно изменить коэффициент вязкости данной жидкости?

3. Можно ли такую лабораторную работу включить в школьный физический практикум? Если да, то в каком классе это можно сделать?

4. Приведите примеры, каким образом целенаправленно уменьшают вязкое трение.

Дополнительное задание

Как экспериментально проверить, зависит ли коэффициент вязкости жидкости от диаметра шарика? Спланируйте эксперимент, проведите его, сделайте вывод по результатам эксперимента.

Библиографический список

1. Архангельский, М.М. Курс физики. Механика: учеб. пособие для студентов физ.-мат. фак. пед. ин-тов / М.М. Архангельский. – Москва: Просвещение, 1975. – 424 с.
2. Иродов, И.Е. Механика. Основные законы / И.Е. Иродов. – Москва: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. – 309 с. – ISBN 978-5-9963-2350-0.
3. Иродов, И.Е. Волновые процессы / И.Е. Иродов. – Москва: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. – 461 с. – ISBN 978-5-94774-692-1.
4. Карасова, И.С. Фундаментальные физические теории в школе: учеб. пособие / И.С. Карасова, М.В. Потапова, П.В. Пекин. – Челябинск: Изд-во Южно-Урал. гос. гуманитарно-пед. ун-та, 2016 – 336 с. – ISBN 978-5-906777-72-0.
5. Лабораторный практикум по общей и экспериментальной физике: учебное пособие для вузов / В.Н. Александров, С.В. Бирюков, И.А. Васильева [и др.]; ред. Е.М. Гершензон, А.Н. Мансуров. – Москва: Академия, 2004. – 461 с.
6. Савельев, И.В. Курс общей физики: учебное пособие для втузов: в 3 кн. Книга 1. Механика. Молекулярная физика / И.В. Савельев. – Москва: КНОРУС, 2012. – 528 с. – ISBN 978-5-406-02588-8.
7. Трофимова, Т.И. Курс физики / Т.И. Трофимова. – Москва: Академия, 2007. – ISBN 978-5-7695-3936-7.
8. Физический практикум. Часть 1. Механика: учебно-методическое пособие для студентов педуниверситетов / П.В. Пекин. – Челябинск: Факел, 1998. – 133 с. – ISBN 5-85716-176-2.

Содержание

Учебное издание

Бочкарева Ольга Николаевна
Беспаль Ирина Ивановна

ФИЗИЧЕСКИЙ ПРАКТИКУМ

МЕХАНИКА

Учебно-методическое пособие

ISBN 978-5-907409-76-7

Работа рекомендована РИС ЮУрГГПУ
Протокол 24 от 2021 г.

Издательство ЮУрГГПУ
454080 г. Челябинск, пр. Ленина, 69

Редактор Е.М. Сапегина
Технический редактор Т.Н. Никитенко

Подписано в печать 08.09.2021 г. Формат 84×90/16
Объем 3,1 уч.-изд. л. (8,93 усл. п. л.). Бумага офсетная
Тираж 100 экз. Заказ №

Отпечатано с готового оригинал-макета в типографии ЮУрГГПУ
454080 г. Челябинск, пр. Ленина, 69