

НБ МИФИ

53
М54

НА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ФИЗИКО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
К ЛЕКЦИОННЫМ ДЕМОНСТРАЦИЯМ
ПО МЕХАНИКЕ**

МОСКВА 1981

СЗ
МСУ

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ СССР
МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
К ЛЕКЦИОННЫМ ДЕМОСТРАЦИЯМ
ПО МЕХАНИКЕ

Утверждено
советом факультета ЭТФ

СЕРИЯ
ЛЕС

Москва 1981

Методические указания к лекционным демонстрациям по механике. —М.: Изд. МИФИ, 1981, 56 с.

Излагается методика проведения основных лекционных демонстраций по разделу "Механика" курса общей физики. Основное внимание в описаниях демонстраций уделено физической сущности наблюдаемых явлений, обсуждению фундаментальных закономерностей в их конкретных проявлениях. Последовательность описаний подобрана так, чтобы обеспечить логическую преемственность рассматриваемых явлений.

Основное внимание в описаниях уделено тем сведениям, которые студенты должны получить в результате проведения опыта и пояснений лектора. Описания дополнены вопросами, обсуждение которых на лекциях или семинарах поможет глубокому пониманию физики.

Вопросы технической реализации опытов, существенные скорее для работников демонстрационного кабинета, чем для лектора, упоминаются лишь постольку, поскольку это необходимо для обсуждения на лекции. Таким образом, описания служат для лектора как бы сценарием демонстрации, а для работников демонстрационного кабинета — перечнем явлений, которые должны наблюдаться в опыте, "техническим заданием" на лекционный эксперимент.

Основная задача методических указаний — помочь преподавателю физики в подготовке лекций с использованием демонстраций. Они полезны и студентам, интересующимся способами наблюдения физических явлений, а также экспериментальной проверкой и обоснованием положений изучаемой теории.

Составитель В. В. Светозаров

СОДЕРЖАНИЕ

ПОДГОТОВКА И ЧТЕНИЕ ЛЕКЦИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДЕМОНСТРАЦИЙ И ДРУГИХ ВИДОВ ТСО.....	5
КИНЕМАТИКА.....	12
1. Модель декартовой системы координат. 2. Правое и левое вращение. 3. Поступательное и вращательное движение. 4. Опыт с точилом. 5. Движение шарика в проекции на два экрана. 6. Независимость горизонтального и вертикального перемещений при движении в поле тяжести. 7. Свободное падение тел. Трубка Ньютона. 8. Скатывание тележки с наклонной плоскости. 9. Конечное угловое перемещение — не вектор. 10. Угловая скорость. 11. Наблюдение вращающихся тел и измерение частоты с помощью стробоскопа. 12. Сложение вращательного движения с поступательным. 13. Кинематические методы измерения линейной скорости. 13.1. Стробоскопический метод. 13.2. Времяпролетный метод.	18
ДИНАМИКА МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ.....	18
14. Тележка на тележке. 15. Взаимодействие стального шарика с магнитом. 16. Взаимодействие двух тележек. 17. Расталкивание тележек взрывом или пружиной. 18. Расталкивание шаров пружиной. 19. Градуировка динамометра. 20. Выдергивание скатерти из-под сосуда с водой. 21. Опыт с инерцией гири. 22. Закон Гука и нелинейная деформация. 23. Соскальзывание бруска с наклонной плоскости. 24. Маятник Максвелла на весах. 25. Опыты со свободным падением тел (опыты Н.А. Любимова). 25.1. Падение пружины, оттягиваемой грузом с указателем. 25.2. Падение маятника.	24
ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ.....	24
26. Маятник Галилея. 27. Маятник Максвелла. 28. Шарик в "мертвой петле". 29. Подпрыгивающий шарик. 30. Пушка на моторе. 31. Динамомашинка с лампой. 32. Шарик на дорожке сложного профиля. 32.1. Потенциальная энергия и силы. 32.2. Фinitное и инфинитное	

движение. 33. Отдача при выстреле. 34. Выстрел с движущейся тележки. 35. Скатывание тележки с подвижной наклонной плоскости. 36. Баллистический маятник. 37. Движение центра инерции системы тел. 38. Неупругий удар шаров. 39. Центральный упругий удар. 39.1. Удар тележек. 39.2. Удар шаров. 40. Нецентральный упругий удар. 41. Сохранение момента импульса (по Хайкину).

НЕИНЕРЦИАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОТСЧЕТА..... 33

42. Выдергивание тележки из-под тяжелого груза. 43. Отвес на тележке, движущейся с ускорением. 44. Опыты со свободным падением. 45. Равенство инертной и гравитационной масс. 46. Отклонение снаряда в неинерциальной системе отсчета. 47. Скатывание тележки с отвесом с наклонной плоскости. 48. Шарик с пружиной на вращающейся платформе. 49. Отвесы на вращающейся платформе. 50. Цепочка на вращающемся диске. 50.1. Круговая цепочка. 50.2. Вытянутая цепочка. 51. Резка дерева бумажным диском. 52. Шарик, катящийся по вращающейся платформе. 53. Выстрел на вращающейся платформе. 54. Трубка с водой на вращающемся диске. 55. Модель маятника Фуко.

МЕХАНИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА..... 42

56. Ломание палки на бумажных кольцах. 57. Скатывание цилиндров с наклонной плоскости. 58. Движение центра инерции твердого тела. 59. Зависимость углового ускорения от момента сил и момента инерции. 60. Пушка на вращающейся платформе. 61. Мотор на вращающейся платформе. 62. Выстрел кривым снарядом. 63. Вращение системы с изменяемым моментом инерции. 64. Человек с велосипедным колесом на скамье Жуковского. 65. Свободные оси. 65.1. Вращение шарнирно закрепленного стержня. 65.2. Бросание параллелепипеда. 65.3. Вращение диска, стержня и цепочки, подвешенных на нити. 65.4. "Колумбово яйцо". 65.5. "Китайский волчок". 66. Гирскопический эффект. 66.1. Юла Максвелла на аркане. 66.2. Отгибание проволочных фигур осью волчка. 66.3. Опыт с большим гироскопом. 67. Гироскоп в кардановом подвесе. 68. Велосипед с гироскопом на проволоке. 69. Прецессия гироскопа. 69.1. Подвешенный волчок. 69.2. Прецессия велосипедного колеса. 69.3. Гироскоп с перегрузками. 70. Гироскопические силы.

ПОДГОТОВКА И ЧТЕНИЕ ЛЕКЦИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДЕМОНСТРАЦИЙ И ДРУГИХ ВИДОВ ТОО

Курс общей физики, изучаемый студентами младших курсов, должен в большой степени отражать экспериментальные основания физической теории. Мощное средство решения этой задачи – лекционные демонстрации, развитие которых является одним из важнейших направлений внедрения технических средств обучения (ТОО).

Проведение опытов на лекции позволяет:

- а) расширить охват экспериментального материала;
- б) избежать опасности абстрагирования и чрезмерной формализации курса, повысить наглядность изложения;
- в) сэкономить время при введении новых понятий;
- г) облегчить понимание излагаемого материала, улучшить взаимопонимание лектора и студентов;
- д) повысить интерес к лекции и к предмету, стимулировать любопытство и активное участие студентов в лекции;
- е) показать студентам приемы работы с аппаратурой.

Лекционные демонстрации предъявляют большие требования к преподавателю, который должен обеспечить использование всех методических возможностей демонстрации. Успех опыта во многом зависит от подготовленности лектора.

При подготовке лекции с использованием демонстраций необходимо тщательно ознакомиться с техникой проведения опытов, относящихся к теме лекции (демонстрационная установка, действия демонстраторов, участие лектора в проведении опыта и т.д.) и определить роль и место опытов в лекции.

Опыты можно разделить на три категории по выполняемым ими функциям:

- а) знакомство с новыми явлениями и понятиями без предварительной подготовки;
- б) проверка или иллюстрация теоретических выводов (наиболее многочисленная группа опытов);
- в) испытание способности студентов применять полученные знания и анализировать новые проблемы.

Оптимальным следует признать количество опытов в пределах 3 – 7 на лекцию. В условиях лимита лекционного времени иногда приходится делать выбор между несколькими опытами одной тематики. В таких случаях опыты более эффективные, но не являющиеся фундаментальными для понимания физики, не должны занимать место менее колоритных, но иллюстрирующих основные принципы. Обязательно следует показывать опыты, позволяющие непосредственно наблюдать изучаемые явления или зависимости. Например, из группы опытов по наблюдению интерференционных картин наиболее ценен опыт, позволяющий раздельно пронаблюдать складываемые световые пучки и убедиться в том, что интенсивность результирующего пучка не равна сумме интенсивностей складываемых, т.е. пронаблюдать собственно явление интерференции.

Как правило, опыт должен являться органической частью процесса изложения материала на лекции, а не развлекательным приложением. С этой целью следует четко указывать наблюдаемые в данном опыте явления, формулировать вопросы, на которые отвечают результаты опыта, или выводы, которые следуют из этих результатов. Исключения из этого правила можно делать для некоторых опытов, иллюстрирующих технические применения физических принципов, уже усвоенных студентами, или для опытов, имеющих целью оживить изложение, "встряхнуть" аудиторию.

Примеры из области науки и техники должны соответствовать современному уровню их развития, даже если демонстрируемый опыт или устройство известны десятки, а то и сотни лет. Желательно связывать эти примеры с научной работой конкретных лиц, кафедр, институтов, стран.

Студенты должны быть не пассивными созерцателями, а активными участниками лекционного эксперимента. Стимулировать любопытство студентов при проведении опытов обычно нет надобности, оно и так велико, но важно организовать это любопытство так, чтобы студент задумался над физической сущностью наблюдаемых явлений и попытался сам их объяснить. Достижению этой цели помогут специально подобранные вопросы и задачи, включенные в описания ряда демонстраций. Простые вопросы, обращающие внимание студентов на тонкости эксперимента, сопутствующие эффекты, нарушение исследуемых зависимостей и т.п., можно задавать по ходу опыта или сразу после него. Более сложные вопросы и задачи предназначены для обсуждения экспериментов на семинарских занятиях.

Критерием глубокого осмысления эксперимента может служить способность студента количественно описать наблюдаемые явления или хотя бы привести описывающие их формулы и графики.

Физика – количественная наука. Реальные физические эксперименты дают, как правило, какой-то количественный результат. Проведение расчетов помогает разобраться в деталях опыта, а в некоторых случаях лишь после расчета становится ясно, наблюдалось ли ожидаемое явление. Количественные опыты познакомят студентов с методами измерений физических величин. Поэтому целесообразно часть опытов доводить до получения численного результата. Основные требования к таким опытам – проведение расчетов в течение предельно малого времени и заинтересованность студентов в результатах расчета.

Легко, например, проверить соотношение между шириной щели d , длиной волны света λ , шириной соответствующих дифракционных максимумов Δx и расстоянием l от щели до экрана:

$$\Delta x = \frac{\lambda l}{d},$$

Если, однако, для количественного опыта взять не щель, а волос одного из студентов, мы проиллюстрируем принцип Бабины и создадим заинтересованность в результатах расчета диаметра волоса по дифракционной картине. Полученный результат ($d \approx 50$ мкм, на два порядка больше λ) поможет устранить нередкое заблуждение, будто дифракция наблюдается лишь на объектах, сравнимых по размерам с длиной волны.

Лекционные опыты – мощное средство создания творческой атмосферы на лекции. Попросите студентов предсказать результаты опыта, дайте возможность студентам самим влиять на проведение опыта, удивите студентов неожиданным результатом с последующим его объяснением. При правильной постановке дела можно даже в простые опыты внести элементы увлекательной атмосферы реального физического эксперимента, где в роли экспериментаторов выступают лектор вместе со студентами.

Особое место занимают опыты-парадоксы, результаты которых противоречат "здравому смыслу".

Академик Л.И. Мандельштам считал разбор парадоксов эффективным методом проникновения вглубь физических проблем. Он говорил: "Есть две степени понимания. Первая, когда вы

изучили какой-нибудь вопрос и как будто знаете все, что нужно, но вы еще не можете самостоятельно ответить на новый вопрос, относящийся к изучаемой области. И вторая степень понимания, когда появляется общая картина, ясное понимание всех связей. Такие вопросы, на которые нельзя ответить, пока этой второй степени понимания нет, мы называем парадоксами. Разбор подобных парадоксов очень полезен для достижения такого полного понимания."

Опыты-парадоксы активизируют аудиторию настолько, что иногда приходится с помощью контрольного эксперимента убеждать студентов в отсутствии мошенничества или вызывать самих студентов для проведения опыта.

Создание парадоксальной ситуации определяется исключительно методикой проведения опыта, почти не зависит от его технической реализации и, следовательно, целиком зависит от лектора. В описаниях сборника имеются указания о возможностях создания таких ситуаций.

В последние годы расширяется использование в учебном процессе телевидения и других технических средств (кино, кадрупроекторы, кодоскопы).

Часто телевизионная система используется для показа текстов, графического и иллюстративного материала. В этом ее вполне может заменить диапроекторная техника, дающая большее разрешение и цветное изображение.

Наиболее перспективная область применения телевидения на лекциях по физике — непосредственное участие телесистемы в лекционном эксперименте, где реализуется ее основное достоинство — возможность показать явления в динамике. Возникает заманчивая ситуация: аудитория — экспериментатор, а телекамера — глаз экспериментатора, позволяющий наблюдать как детали установок, так и физические явления.

Мелкомасштабные опыты и установки с помощью телесистемы становятся хорошо видимыми всей аудитории. Возможный вариант: установку в целом и действия демонстраторов аудитория наблюдает непосредственно, а телекамера дает укрупненное изображение части установки, в которой наблюдается изучаемое явление.

С большим трудом усваивается студентами теория движения в неинерциальных системах отсчета. Телекамера, размещенная в системе, движущейся с ускорением поступательно или вращающейся, поможет зримо представить особенности пове-

дения тел в неинерциальной системе отсчета и существенно облегчит понимание вопроса.

Наличие электронных пучков в телевизорах и телекамерах позволяет легко демонстрировать силу Лоренца — достаточно поднести магнит к работающему прибору.

При показе мелкомасштабных опытов по электромагнетизму телекамера может служить индикатором магнитного поля: при включении поля изображение чуть искажается или смещается. Посуточно студенты убеждаются в том, что электронные лучевые приборы следует защищать от внешних магнитных полей.

Телекамера — система, дающая резкое изображение предметов, расположенных в небольшой области пространства, и в этом качестве сама может быть элементом экспериментальной установки.

Многие видиконы чувствительны в ближней инфракрасной области спектра. В частности, легко показать свечение светодиода с длиной волны 0,9 мкм, невидимое для невооруженного глаза; одновременно это простой способ проверки светодиодов.

Хорошие результаты дает стыковка телекамеры с микроскопом, спектрографом, осциллографом.

Велики возможности видеозаписи, например, для наблюдения явлений в измененном масштабе времени.

Упомянем другие возможные применения телесистемы: показ графического и иллюстративного материала; наблюдение за ходом лекции и ее записи; видеозапись лекционных демонстраций в целях обучения лаборантов и преподавателей или для показа демонстраций в записи в аудиториях, не приспособленным для проведения экспериментов; использование телеэкрана в качестве дисплея вычислительной машины с целью моделирования изучаемых явлений на лекции, семинаре или в лаборатории.

Распространенные виды ТСО, слайды, плакаты, эпидиапроекции в курсе общей физики распределены неравномерно.

При изложении механики, молекулярной физики и электричества встречается сравнительно мало рисунков, которые было бы сложно изобразить на доске. Поскольку процесс рисования сопровождается осмыслением рисунка студентами и неразрывно связан с логическим развитием лекции, лектор часто предпочитает рисунок на доске слайду с готовым рисунком. Смысловая нагрузка на слайды и плакаты становится заметной в курсе оптики и особенно в курсе атомной физики, в котором эти виды ТСО частично компенсируют отсутствие лекционных

демонстраций. Плакаты предпочтительнее слайдов в тех случаях, когда к рисунку приходится обращаться неоднократно в течение лекции.

Тематика слайдов и плакатов в курсе общей физики:

- а) рисунки, поясняющие излагаемый материал – в основном в курсах оптики и атомной физики;
- б) схемы экспериментов, обсуждаемых в рамках курса;
- в) информация о результатах экспериментов, подтверждающих или опровергающих излагаемую теорию: фотография наблюдаемого явления, графики с нанесенными экспериментальными точками, таблицы и т.д. Такая информация подчеркивает тесную связь теории с экспериментом и повышает интерес к лекции, при этом полезно приводить ссылки на конкретный источник информации (журнал, автор и т.д.);
- г) фотографии и рисунки физических установок, дающие представление об их реальных масштабах и сложности;
- д) схемы сложных демонстрационных установок, показываемые перед проведением опыта на лекции.

Отметим, что использование слайда со схемой опыта или демонстрационной установки существенно сокращает время на объяснение опыта. Приведенные в описаниях схемы дублированы на слайды и могут быть заказаны лектором.

Эпи- и диапроекции используются для демонстрации некоторых мелкомасштабных опытов, а также для оперативного показа графического материала (рисунок из книги и т.п.).

При выборе иллюстративного материала следует учитывать, что большое количество используемых слайдов и плакатов делает лекцию чересчур "пестрой". Кроме того, 3 – 5 слайдов, показанные подряд, заметно утомляют аудиторию.

В МИФИ осуществляется оперативное изготовление черных слайдов. Заказ и соответствующий графический материал следует сдать не позднее, чем за 7 дней до лекции в отдел технических средств обучения (ОТСО).

Применение кино на лекциях по физике件 полезно лишь в некоторых случаях. Непосредственно на лекции могут быть показаны короткие кинофрагменты (1 – 3 мин), как правило немые, с тем, чтобы пояснения мог давать лектор. Основная тематика фрагментов – физические эксперименты, в том числе демонстрационные опыты. В вузах, не имеющих мощных демонстрационных кабинетов, кинофрагменты заменяют лекционные демонстрации, хотя такая замена и неполноценна.

В МИФИ использование кино на лекциях по физике широкого распространения не получило, поскольку имеется возможность демонстрировать опыты непосредственно на лекции.

При использовании кино для лучшего понимания и усвоения материала большую помощь может оказать мультипликация. Отметим возможность создания мультфильмов с помощью вычислительной техники (съемки с графопостроителя или с экрана дисплея ЭВМ).

Успешное усвоение курса во многом определяется живым контактом преподавателя с аудиторией, возможностью гибкой и быстрой реакции преподавателя при возникновении затруднений у студентов. В связи с этим технические средства, используемые в учебном процессе, должны помогать преподавателю, но не подменять его. Для кино этот аспект особенно важен. Поэтому учебные и научно-популярные фильмы длительностью 10 – 40 минут целесообразно демонстрировать вне учебного времени, на лекциях же могут использоваться короткие фрагменты из этих фильмов.

ОТСО МИФИ располагает перечнем фильмов, которые имеются в институте или могут быть заказаны в кинопрокате. Лекторам предоставляется возможность просмотреть интересующий их фильм и заказать фильмы или отдельные фрагменты к лекции.

КИНЕМАТИКА

1. Модель декартовой системы координат

На объемной модели иллюстрируются понятия: радиус-вектор точки, проекции на плоскость и на координатные оси, правая и левая система координат. Три стержня, разделенные метками на равные интервалы, изображают координатные оси. Шарик (материальная точка) укреплен на конце стрелки, изображающей его радиус-вектор.

Вопрос 1. Сколько величин необходимо для определения положения точки, если задавать: а) декартовы координаты; б) модуль радиус-вектора и углы между радиус-вектором и координатными осями? Вопрос 2. Найдите на модели декартовы, сферические и цилиндрические координаты шарика.

2. Правое и левое вращение

С помощью диска, снабженного стрелками (рис. 1), демонстрируют различные соотношения между направлениями вращения и поступательного движения.

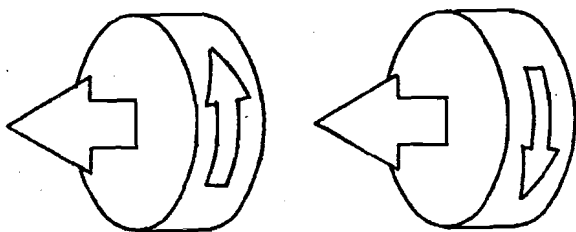


Рис. 1

3. Поступательное и вращательное движение

С помощью модели колеса обозрения демонстрируется различие между поступательным движением по окружности и вращательным движением твердого тела. При вращении колеса подвешенная к нему кабина движется поступательно. Обратите внимание на то, что связанные с кабиной прямые линии, в том числе выделенная линия АВ, остаются параллельными начальному положению. Качнув кабину, наблюдаем ее вращательное движение.

Вопрос. Сравните ускорения различных точек кабины.

4. Опыт с точилом

Доказывается, что линейная скорость направлена по касательной к траектории. Прикасаясь твердым стержнем к вращающемуся точильному камню, наблюдаем в темноте светящееся кольцо, с которого, строго по касательной, слетают отдельные светящиеся частицы (рис. 2).

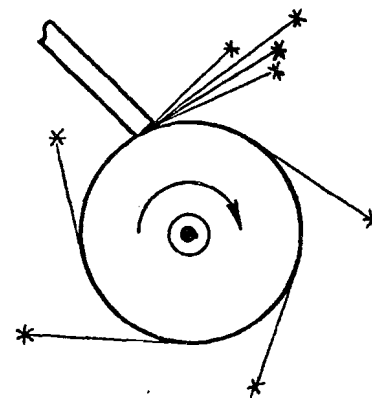


Рис. 2

Вопрос. Почему в области касания образуется широкий пучок искр? Не нарушается ли здесь демонстрируемое свойство скорости?

5. Движение шарика в проекции на два экрана

Иллюстрируется координатный метод описания положения и движения материальной точки. Шарик может двигаться по горизонтальному желобу, который, в свою очередь, может вращаться вокруг вертикальной оси. Любая, в том числе, сложная траектория шарика в горизонтальной плоскости полностью описывается прямолинейными перемещениями его "проекций" - теней шарика на двух экранах, получаемых при освещении взаимно перпендикулярными пучками света. Частный случай - движение шарика вдоль одного из пучков. При этом соответствующая "проекция" не смещается.

Вопрос. Найдите соотношения между координатами точки, если ее радиус-вектор изменяется: а) только по величине; б) только по направлению.

6. Независимость горизонтального и вертикального перемещения при движении в поле тяжести

Два шарика - один, отпущенный с нулевой начальной скоростью, и другой, брошенный в тот же момент горизонтально, падают на пол или на стол одновременно. **Вывод:** движение по вертикали не зависит от горизонтальной компоненты начальной скорости.

7. Свободное падение тел. Трубка Ньютона

Показывается, что в отсутствие сопротивления воздуха (в откачанной трубке) все тела падают с одинаковым ускорением.

8. Скатывание тележки с наклонной плоскости

Демонстрируется пример равнопеременного движения. Тип движения определяется по характерному признаку: пути, пройденные в последовательные равные промежутки времени, относятся как последовательные нечетные числа. Промежутки времени задаются метрономом, отрезки пути - метками на наклонной плоскости и флажками. Расстояния между соседними флажками относятся как 1:3:5... . Укрепленный на тележке рычаг поворачивает флажки в такт с ударами метронома.

Вопрос. Найдите ускорение тележки и ее скорость в конце первого участка движения, если этот участок длиной $l = 0,2$ м пройден за интервал времени $t = 1$ с.

9. Конечное угловое перемещение - не вектор

Показывают, что повороты на конечный угол не обладают присущим векторам свойством - коммутативностью. Параллелепипед или книгу поворачивают на 90° последовательно вокруг двух взаимно перпендикулярных осей. При различных порядках следования поворотов получаем различные конечные положения тела. Оси вращения могут быть фиксированы в пространстве или связаны с телом.

10. Угловая скорость

Поясняется определение угловой скорости. Диск с нанесенной на нем полосой медленно вращается (1 - 2 об/с) при стробоскопическом освещении. Вследствие инерционности зрения мы видим несколько последовательных положений полос, повернутых одна относительно другой на некоторый угол. Определив "на глаз" этот угол и зная интервал времени между вспышками стробоскопа, можно оценить величину угловой скорости диска.

11. Наблюдение вращающихся тел и измерение частоты вращения с помощью стробоскопа

Вентилятор или диск с полосой, посаженный на вал электродвигателя, освещают стробоскопом, частота вспышек которого подбирается равной частоте вращения, в результате вращающийся вентилятор или диск кажутся неподвижными. При не точном совпадении частот наблюдаем медленное вращение (студентам можно предложить задачу об определении скорости этого вращения). Для того, чтобы показать, что диск вращается, а его "неподвижность" - иллюзия, попробуйте провести мелом радиальную черту на якобы неподвижном (при стробоскопическом освещении) диске.

Вопрос. Найдите частоту вращения диска ν_1 , если частота вспышек стробоскопа ν_2 , и изображение диска вращается с частотой ν в ту же сторону, что и диск.

12. Сложение вращательного движения с поступательным

Показывают существование мгновенного центра вращения.

Варианты опыта: а) пятнистый диск вращается на валу мотора, установленного на движущуюся тележку; направления вращения диска и движения тележки можно изменять; б) тот же диск катится по столу. Вблизи мгновенного центра вращения пятна на диске видны отчетливо, в остальных точках — размываются.

Вопрос 1. Как по известным скоростям двух точек диска найти мгновенный центр вращения? Вопрос 2. Могут ли две точки твердого тела (А и В) иметь указанные на рис. 3 скорости?

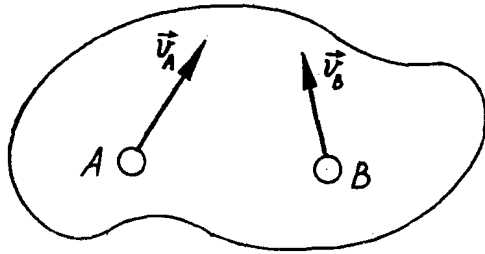


Рис. 3

13. Кинематические методы измерения линейной скорости

Демонстрируются практические методы измерения скорости, в которых измеряется либо расстояние, проходимое телом в течение заранее известного промежутка времени, либо время, затрачиваемое на прохождение заранее известного пути. Динамические методы (например, на основе закона сохранения импульса) обсуждаются в разделе "Законы сохранения".

13.1. Стробоскопический метод. Взмахнув рукой с зажатым в ней предметом (белая палочка на темном фоне), при стробоскопическом освещении наблюдаем несколько изображений предмета. Оценивая на глаз расстояние между соседними изображениями и зная частоту вспышек стробоскопа, находим скорость предмета. Вариант опыта — в темноте перемещаем неоновую лампу, питаемую переменным током. Предложите сту-

дентам определить максимальную скорость собственной руки, используя свет газоразрядных ламп, пульсирующий с частотой 100 Гц.

Метод удобен тем, что позволяет непрерывно регистрировать скорость и тем самым изучать зависимость скорости от времени. Уронив при стробоскопическом освещении белый шарик, наблюдаем увеличение скорости, подбросив шарик вверх — уменьшении и затем увеличение скорости.

13.2. Времяпролетный метод. Этот метод более распространен и в последнее время все шире используется в физических экспериментах для измерения скорости частиц. Рассмотрим несколько вариантов метода.

Прямое измерение времени пробега. Тележка замыкает расположенные на рельсах контакты, сигнал с которых выводится на осциллограф. По известной длительности развертки находим время прохождения расстояния между контактами. Вариант опыта — пуля пробивает две пары листочков металлической фольги, при этом регистрируются моменты замыкания пулей листочков каждой пары.

Вращающиеся диски. Два бумажных диска установлены на валу электромотора на расстоянии l друг от друга и простреливаются пулей дважды: при остановленном и при вращающемся роторе мотора. Используя отверстия, пробитые в неподвижных дисках, для фиксации их относительного положения, наблюдаем снятие с мотора и наложенные друг на друга диски в диапроекции. Отверстия, пробитые во вращающихся дисках, смещены на некоторый угол φ . Находим скорость пули:

$$v = \frac{l}{\Delta t} = \frac{\omega l}{\varphi},$$

где Δt — время прохождения пулей расстояния между дисками, ω — угловая скорость ротора двигателя.

Установка с вращающимися дисками использовалась Ламмертом (1929 г.) в качестве селектора скоростей молекул. Аналогичные установки (вращающиеся цилиндры или диски с просверленными по диаметру каналами) используются в настоящее время для селекции скоростей нейтронов и других частиц.

Вопрос. Предположите практические способы определения скорости света, электрона, молекулы, броуновской частицы, птицы, автомобиля, самолета, спутника Земли, орбитального движения Земли, далекой звезды.

ДИНАМИКА МАТЕРИАЛЬНОЙ ТОЧКИ

14. Тележка на тележке

Иллюстрируется закон инерции и одновременно — сложность наблюдения этого закона "в чистом виде."

На тележке установлены рельсы, на которых размещена вторая тележка. Трение в подшипниках колес верхней тележки считаем пренебрежимо малым. При колебательном движении нижней тележки, верхняя остается почти неподвижной относительно демонстрационного стола, что объясняется малостью действующих на нее сил. Если, однако, изучать движение верхней тележки более внимательно (на стол устанавливаем флажок, относительно которого легко заметить малые перемещения тележки), окажется, что верхняя тележка совершает небольшие колебания.

Вопрос 1. Выполняется ли закон инерции в системе отсчета, связанной с нижней тележкой? С верхней тележкой?
Вопрос 2. Пусть трение в подшипниках пренебрежимо мало, а колеса относительно рельс не проскальзывают. Должна ли в этих условиях колебаться верхняя тележка? Оцените амплитуду ее колебаний, зная отношение массы колес (сплошные диски) к массе всей тележки.

15. Взаимодействие стального шарика с магнитом

Показываем, что причиной появления ускорения является взаимодействие шарика с другими телами:

1. Приближая магнит к шарiku, лежащему на столе, убеждаемся, что тот начинает двигаться с ускорением.

2. После скатывания с наклонного желоба шарик катится по столу равномерно и прямолинейно. Если же вблизи траектории шарика расположить магнит — траектория искривляется.

Вопрос 1. Как меняются величина и направление скорости шарика в первом и втором опытах? Куда направлено его

ускорение? Вопрос 2. Приведите пример равномерного движения с постоянным по величине ускорением.

16. Взаимодействие двух тележек

Показываем, что соотношение между ускорениями взаимодействующих тел не зависит от характера взаимодействия и определяется соотношением масс этих тел. Опыт поясняет понятие "масса тела" и позволяет ввести характеристику взаимодействия — силу, равную произведению массы на ускорение тела.

Для тележки с установленными на них электродвигателями соединены нитью, закрепленной на валах двигателей. При включении двигателей нить наматывается на валы, и тележки сближаются. Отношение ускорений определяется по отношению расстояний, пройденных тележками до встречи (начальные положения тележек и точка встречи отмечаются флажками). Одинаковые тележки проходят одинаковые расстояния независимо от того, работают ли оба двигателя или один, а также от величины подаваемого на двигатели напряжения. Тележки различных масс (на одну из тележек устанавливаем гирию) движутся с разными по величине ускорениями, но и в этом случае отношение пройденных расстояний, а следовательно и ускорений не зависит от режима работы двигателей.

Вариант опыта: два человека на двух тележках притягиваются друг к другу посредством каната. Для получения различных масс на одну из тележек становится еще один человек.

17. Расталкивание тележек взрывом или пружиной

Аналог опыта 16, показывающий, что наблюдавшиеся в опыте 16 закономерности справедливы для любого вида взаимодействия, Варианты опыта: а) на одной тележке установлена пушка, снаряд которой закреплен на второй тележке; б) между тележками зажата пружина, удерживаемая нитью; затем нить пережигается.

18. Расталкивание шаров пружиной

Демонстрируется сравнение масс тел по изучению взаимодействия. Между двумя шарами, подвешенными на нитях, зажата пружина, удерживаемая нитью. При пережигании нити ша-

ры расталкиваются и приобретают одинаковые по величине скорости, о чем судят по одинаковым углам отклонения нитей подвеса. Вывод: массы шаров одинаковы.

Примем массу одного из шаров за эталон массы и заменим второй шар новым, того же размера и цвета. Вопрос к аудитории - как оценить массу этого шара? Наблюдаем, что при расталкивании пружиной новый шар отклоняется на значительно больший угол, чем "эталонный". Вывод: масса нового шара меньше массы "эталонного". Поясняем, что в проверке это утверждение не нуждается, поскольку отношение масс устанавливается через отношение ускорений по определению. Взвешивая затем эти шары на пружинных весах, мы проверяли бы закон Гука, но не отношение масс шаров.

19. Градуировка динамометра

Поясняется определение силы ($\vec{F} = m\vec{w}$) и ее измерение, соответствующее этому определению ([3], стр. 51). Тележка с установленным на ней динамометром движется ускоренно благодаря нити, привязанной к динамометру и натягиваемой двигателем. Показания динамометра сравниваем с ускорением тележки. Для оценки ускорения измеряется (с помощью метронома) время прохождения фиксированного расстояния с момента начала движения.

Вопрос. Как изменилось ускорение, если указанное время уменьшилось в два раза?

20. Выдергивание скатерти из-под сосуда с водой

Демонстрируется соотношение между приращением импульса тела и импульсом силы $\Delta p = F\Delta t$.

Если скатерть тянуть медленно, сосуд перемещается вместе с ней. При резком выдергивании скатерти сосуд остается практически на месте вследствие малого Δt . Для большей эффективности сосуд располагают на краю стола.

21. Опыт с инерцией гири

Демонстрируется соотношение $\Delta p = F\Delta t$. К тяжелой гире привязаны две одинаковые нити, на одной из которых она под-

вешена. Если тянуть вниз за вторую нить, то обрывается верхняя нить, так как сила ее натяжения больше на величину веса гири. При резком рывке вниз гиря остается на месте и рвется нижняя нить - мал импульс, сообщенный гире за малый интервал времени Δt .

Задача. По известным массе гири m , коэффициенту упругости верхней нити k и предельной силе натяжения T найти импульс, который можно сообщить гире без угрозы обрыва верхней нити.

22. Закон Гука и нелинейная деформация

Исследуются закономерности упругой деформации. К пружине, снабженной шкалой и указателем, подвешивают один, два, три одинаковых груза и убеждаются, что растяжение пружины пропорционально количеству подвешенных грузов: каждый дополнительный груз вызывает смещение указателя на одно деление шкалы. Вывод: при малых деформациях выполняется закон Гука.

Увеличивая количество подвешенных грузов, наблюдаем, что каждый груз стал давать меньшее, чем в начале опыта, удлинение пружины, т.е. большие деформации нелинейны.

Затем можно определить вес произвольного тела в единицах веса первоначально использовавшихся грузов.

Вопрос. Можно ли для измерения веса использовать область нелинейной деформации?

23. Соскальзывание бруска с наклонной плоскости

Рассматриваются некоторые свойства сил трения и способ определения коэффициента трения. Брусок кладут на наклонную доску и подбирают угол наклона α , при котором брусок соскальзывает с постоянной скоростью. Поставив на брусок гирю, убеждаемся, что этот угол практически не изменился. Отсюда следует, что сила трения пропорциональна силе нормального давления и можно ввести коэффициент трения k .

Вопрос. Докажите соотношение $\operatorname{tg} \alpha = k$.

Увеличивая угол наклона доски, начиная от горизонтального положения, наблюдаем явление застоя: после трогания с места брусок движется ускоренно, следовательно, максимальная сила трения покоя больше силы трения скольжения.

Заменяв брусок, убеждаемся в зависимости коэффициента трения от свойств поверхностей тел.

24. Маятник Максвелла на весах

Измеряется вес ускоренно движущегося тела. Маятник Максвелла, удерживаемый нитью в поднятом положении, уравновешен на рычажных весах. При пережигании нити маятник начинает опускаться с ускорением, и весы показывают уменьшение его веса. При движении маятника вверх (нити маятника наматываются на вал маховика) ускорение попрежнему направлено вниз и вес маятника попрежнему меньше, чем в состоянии покоя. При прохождении нижнего положения меняется направление скорости маховика. В этой области маховик имеет большое ускорение, направленное вверх, и весы показывают резкое увеличение веса. Для регистрации веса при спуске и подъеме маятника рывок, возникающий при прохождении нижнего положения, приходится демпфировать.

Вопрос. Постройте графики зависимости ускорения маятника и его веса от времени. Задача решается точно в рамках студенческого курса динамики вращательного движения, если диаметр вала маятника много меньше длины нитей, на которых он подвешен. На данном этапе можно ограничиться качественным описанием.

25. Опыты со свободным падением тел (опыты Н. А. Любимова)

Доказывается, что свободно падающие тела находятся в состоянии невесомости и демонстрируется поведение механических систем в этих условиях. Исследуемые системы размещаются на доске, которая, скользя по направляющим, падает с высоты 6 м вдоль лицевой стены аудитории.

25.1. Падение пружины, оттягиваемой грузом с указателем. При неподвижной доске пружина растянута. Когда доска начинает падать, груз перестает растягивать пружину. Вывод: вес груза равен нулю.

25.2. Падение маятника. Доска начинает падать при двух состояниях размещенного на ней колеблющегося маятника: в момент наибольшего отклонения маятника или в момент прохождения маятника положения равновесия. В первом случае откло-

нение маятника остается неизменным при падении доски, во втором — маятник равномерно вращается.

Объяснение полезно дать в двух системах отсчета: лабораторной и связанной с падающей доской. Перед проведением второго опыта попросите студентов предсказать поведение маятника.

Вопрос 1. Пусть доска падает с ускорением свободного падения. Постройте график зависимости ускорения вращающегося на ней маятника от времени. Вопрос 2. Будет ли доска падать с ускорением свободного падения при сравнимых массах доски и маятника? Что будет двигаться с таким ускорением?

ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ

26. Маятник Галилея

Демонстрируется сохранение механической энергии при движении в поле сил тяжести, сопровождаемым переходом потенциальной энергии в кинетическую энергию поступательного движения и обратно.

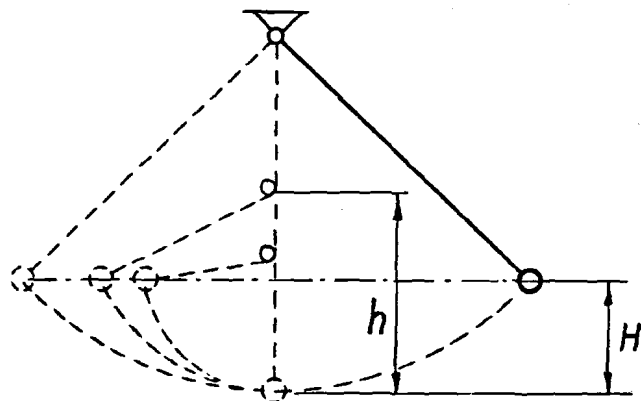


Рис. 4

Маятник (груз, подвешенный на нити) отклоняют, поднимая груз на некоторую высоту H (рис. 4), и отпускают. При дальнейшем движении груз снова поднимают на ту же высоту независимо от формы траектории, которая варьируется путем установки препятствия (стержень, ограничивающий движение нити), на некотором расстоянии h от нижнего положения груза. Вопрос 1. Поднимется ли груз на прежнюю высоту, если $h = H/2$ или $h < H/2$? Обсудите для этого случая выполнения закона сохранения энергии. Вопрос 2. Найдите диапазо-

ны значений h , для которых: а) груз снова поднимется до высоты H ; б) груз совершит полный оборот вокруг стержня.

27. Маятник Максвелла

Наблюдают переход потенциальной энергии в кинетическую энергию вращательного движения и обратно. Маятник (маховик, подвешенный на двух нитях, намотанных на его вал) периодически опускается и снова поднимается почти на прежнюю высоту.

Вопрос. Оцените соотношение между энергиями поступательного и вращательного движения, если диаметр вала в 20 раз меньше диаметра маховика.

28. Шарик в "мертвой петле"

Потенциальная энергия переходит в энергию сложного (поступательное плюс вращательное) движения тела. Шарик скатывается с высоты h (рис. 5) по дорожке, выполненной в форме "мертвой петли", и при достаточно большой величине h пробегает всю дорожку, не отрываясь от нее.

Вопрос. Сравните значения h , необходимые для пробегания дорожки в случаях: а) дорожка абсолютно гладкая; б) шарик катится по дорожке без проскальзывания. Зависят ли эти значения от диаметра шарика?

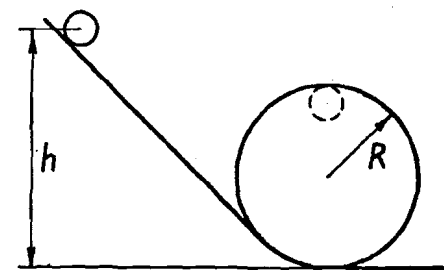


Рис. 5

29. Подпрыгивающий шарик

Демонстрируют цепочку превращений энергии: потенциальная в поле тяжести – кинетическая – энергия упругой деформации – кинетическая – потенциальная в поле тяжести. Стальной шарик, удерживавшийся электромагнитом, при выключении магнита падает, ударяется об упругую плиту (стекло или сталь), подпрыгивает до прежней высоты и прилипает к вновь включенному магниту. Если магнит не включать, высота подпрыгиваний постепенно уменьшается. Наблюдение удобно вести в проекции.

Вопрос. Укажите возможные каналы потери механической энергии шарика.

30. Пушка на моторе

Наблюдаем переход работы силы трения во внутреннюю энергию тела. Трубка, содержащая небольшое количество воды или эфира, установлена на валу электромотора и закрыта пробкой. При обжимании вращающейся трубки деревянными колодками вода (эфир) закипает, и пробка выстреливается.

31. Динамомашинка с лампой

При вращении ручной динамомашинки с подключенной к ней лампой наблюдаем цепочку превращений энергии: механическая работа – энергия электромагнитного поля – внутренняя энергия нити лампы – энергия излучения – внутренняя энергия окружающих лампу тел.

Вопрос. Укажите области локализации упомянутых видов энергии.

32. Шарик на дорожке сложного профиля

Демонстрируется ряд ситуаций, характерных для одномерного движения материальной точки в потенциальном поле сил. Поскольку высота подъема шарика h над поверхностью стола пропорциональна его потенциальной энергии, профиль дорожки

(рис. 6) можно рассматривать как график зависимости потенциальной энергии U от горизонтальной координаты x .

32.1. Потенциальная энергия и силы. Проверим справедливость соотношения $F_x = -\frac{dU}{dx}$. Шарик помещается в точки A, B, C, D, E , затем опускается. Знак $\frac{dU}{dx}$ определяем по профилю дорожки, а знак F_x – по направлению ускорения. Убеждаемся, что в точках, где $\frac{dU}{dx} = 0$, имеются положения равновесия: в т. A равновесие устойчивое, в т. B – неустойчивое.

Вопрос 1. Рассматривая рис. 6 как график зависимости $U(x)$, постройте график $F_x = (x)$.

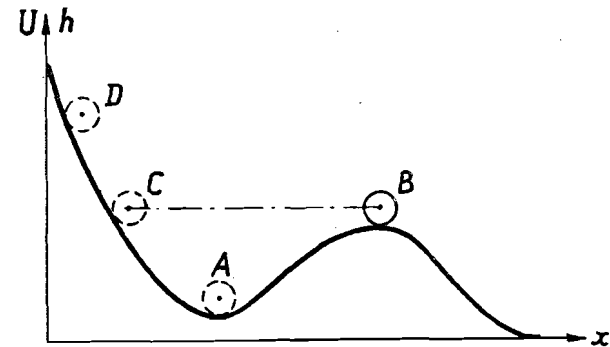


Рис. 6

Вопрос 2. Покажите, что при малых отклонениях шарика от положения устойчивого равновесия действующие на него силы носят квазиупругий характер.

Вопрос 3. При интерпретации опыта мы подменяем поле сил тяжести с потенциальной энергией $U = mgh$ некоторым полем горизонтальных сил с энергией $U(x) = mgh(x)$.

Покажите, что: а) проекция на ось X суммы реальных сил, действующих на шарик, определяется выражением $-\frac{dU}{dx} = -mg \frac{dh}{dx}$ лишь при малом угле наклона дорожки к горизонту; б) если траектория шарика жестко задана (считаем шарик "привязанным" к дорожке), движение его не изменится при замене поля сил тяжести указанным полем горизонтальных сил.

32.2. Фinitное и инфинитное движение. Показываем зависимость характера движения от соотношения между полной энергией тела и глубиной потенциальной ямы, а также условия преодоления телом потенциального барьера. Если шарик отпу-

стать в положении между точками A и C , наблюдается финитное движение. При отпускании в точке D шарик преодолевает "потенциальный барьер" и движение оказывается инфинитным.

33. Отдача при выстреле

Изучается поведение импульса замкнутой и незамкнутой систем взаимодействующих тел. При выстреле из пушки, установленной на тележке, как снаряд, так и тележка, приобретают импульсы, поскольку каждое тело в отдельности не является замкнутой системой. Вследствие малой массы снаряда скорость его значительно больше скорости тележки. Систему "снаряд плюс тележка" можно считать замкнутой, и импульс ее не должен изменяться. Привязываем снаряд к тележке и наблюдаем, что после выстрела тележка и снаряд покоятся.

34. Выстрел с движущейся тележки

В опыте подчеркивается векторный характер импульса, а также тот факт, что при взаимодействии тел происходит, строго говоря, не приобретение импульса этими телами, а обмен импульсами или передача импульса, так что суммарный импульс сохраняется, а импульсы отдельных тел могут как увеличиваться так и уменьшаться.

Толкнув тележку с установленной на ней пушкой, сообщаем ей некоторую начальную скорость, затем производим выстрел (тележка проезжает мимо электрода разрядника, поджигающего горючую смесь в пушке).

При выстреле в направлении движения, тележка останавливается (для этого соответственно подбирается ее начальная скорость) - весь импульс тележки передается снаряду.

При выстреле назад возрастают по величине импульсы и снаряда и тележки: скорость тележки увеличивается, а скорость снаряда оказывается значительно больше скорости тележки. Однако, в силу векторного характера импульса, суммарный импульс остается прежним.

Вопрос 1. Чей импульс больше по величине после выстрела назад - снаряда или тележки?

При выстреле перпендикулярно направлению движения скорость тележки не меняется. Вопрос 2. Изменяется ли в этом случае импульс системы снаряд-тележка? Почему? Куда направлены приращение импульса и полный импульс после выстрела?

При выстреле снарядом, привязанным к тележке, скорость ее остается прежней, независимо от направления выстрела - еще раз убеждаемся в сохранении импульса замкнутой системы. Вариант опыта: начальную скорость тележка получает, скатываясь с наклонной плоскости.

35. Скатывание тележки с подвижной наклонной плоскости

Векторный характер импульса и законы сохранения импульса иллюстрируется при обсуждении двумерного движения системы тел в отличие от ранее рассматривавшегося одномерного движения.

Тележка помещается на наклонные рельсы, установленные на второй тележке. В начальном состоянии верхняя тележка удерживается нитью. При пережигании нити верхняя тележка скатывается, а нижняя (с рельсами) откатывается по горизонтальному столу в противоположную сторону.

Вопрос 1. Сохраняется ли импульс системы тележек? Сохраняются ли его проекции на координатные оси? Вопрос 2. Куда направлено приращение импульса системы в процессе скатывания? Вопрос 3. Найдите соотношение между проекциями скоростей тележек на горизонтальную ось и между модулями их скоростей. Вопрос 4. Как изменяются действующие на верхнюю тележку силы при пережигании нити? Тот же вопрос относительно внешних сил, действующих на систему тележек. Вопрос 5. Куда направлено ускорение верхней тележки?

36. Баллистический маятник

Показываем модификацию распространенного метода измерения импульса или скорости. Пушка, подвешенная на тонких стержнях, производит выстрел в горизонтальном направлении, при этом подвес отклоняется на некоторый угол α .

Вопрос 1. Определите скорость снаряда по известным массам пушки M и снаряда m , длине подвеса l и по изме-

ренному в опыте углу α . Вопрос 2. При β - распаде импульсы электрона и испустившего электрон ядра оказываются неколлинеарными. Чем это можно объяснить?

37. Движение центра инерции системы тел

Закон сохранения импульса эквивалентен утверждению о постоянстве скорости центра инерции замкнутой системы тел. Это постоянство и демонстрируется в опыте.

Две тележки соединены пружиной. Между тележками, с помощью шарнирного устройства или упругих нитей, закреплена лампа, движение которой копирует движение центра инерции системы: при одинаковых массах тележек лампа крепится посередине между ними, при разных массах - ближе к более тяжелой тележке. После толчка тележки совершают колебательные движения, а лампа покоится или движется равномерно вдоль демонстрационного стола.

38. Неупругий удар шаров

Пример процесса, в котором импульс сохраняется, а механическая энергия - нет. Два одинаковых пластилиновых шара подвешены рядом на нитях. Один шар отклоняем и отпускаем. После удара шары слипаются и отклоняются на меньший угол.

Вопрос 1. Первый шар был поднят на высоту h . На какую высоту поднимутся два шара после удара? Вопрос 2. Опишите изменение энергии и импульса пары шаров от момента отпускания первого шара до полного затухания движения шаров. Какая доля механической энергии теряется при ударе?

39. Центральный упругий удар

Показываем характерные соотношения между скоростями тел до и после удара.

39.1. Удар тележек. Две тележки снабжены упругими буферами. Одна из них покоится, вторая на нее наезжает. В зависимости от соотношения масс тележек (тележки одинаковые, но на одну из них можно поставить гирию), наезжающая тележка продолжает после удара двигаться в прежнем направлении,

либо останавливается (происходит обмен скоростями), либо откатывается в обратном направлении.

39.2. Удар шаров. Наблюдаем и объясняем эффектные результаты цепочки последовательных столкновений одинаковых бильярдных шаров, подвешенных на нитях (рис. 7,а). Для того, чтобы в ударе одновременно участвовали не более двух шаров, в начальном состоянии между шарами имеются небольшие зазоры.

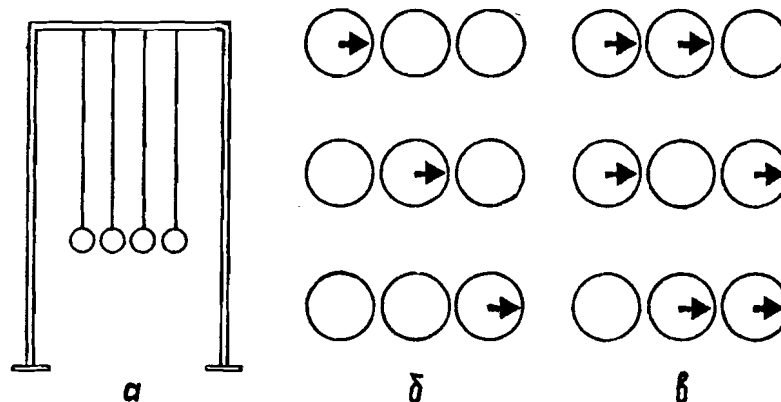


Рис. 7

Вначале оставляем два шара, как и в опыте 38. Результат упругого удара существенно отличается от результата неупругого - налетающий шар останавливается, передав скорость покоившемуся. Затем устанавливаем цепочку из 3 - 5 шаров, отклоняем и отпускаем крайний шар. После удара отскакивает один шар с противоположной стороны цепочки. Процесс соударений пояснен на рис. 7,б. Отклонив два шара, наблюдаем отскакивание двух шаров с противоположной стороны цепочки. Пояснение приведено на рис. 7,в.

40. Нецентральный упругий удар

Показываем интересную особенность упругого удара тел одинаковой массы: в системе отсчета, где одно из тел покоилось, скорости тел после удара ортогональны. Стальной шарик устанавливаем на отмеченную мелом точку на столе. С

помощью кия накатываем второй такой же шарик и отмечаем мелом направления скоростей шариков после удара. Прикладывая к отметкам угольник, убеждаемся в ортогональности скоростей. Вариант опыта: шарики катятся по листу копировальной бумаги при этом траектория их регистрируется на подложенном ниже листе белой бумаги.

Вопрос. Укажите возможные причины неортогональности скоростей одинаковых нерелятивистских частиц: а) атом водорода сталкивается с покоившимся свободным атомом водорода; б) протон рассеивается на покоившемся свободном протоне.

41. Сохранение момента импульса (по Хайкину)

Обсуждается закон сохранения момента импульса в поле центральных сил. Два груза А и В (рис. 8), свободно скользящие по горизонтальному стержню, соединены растянутой пружиной и удерживаются от сближения нитью С. Стержень помещен на легкой рамке, свободно вращающейся вокруг вертикальной оси. При пережигании нити грузы сближаются, и скорость вращения рамки резко увеличивается. Считая грузы материальными точками и пренебрегая массой рамки со стержнем, обсуждаем следующие вопросы.

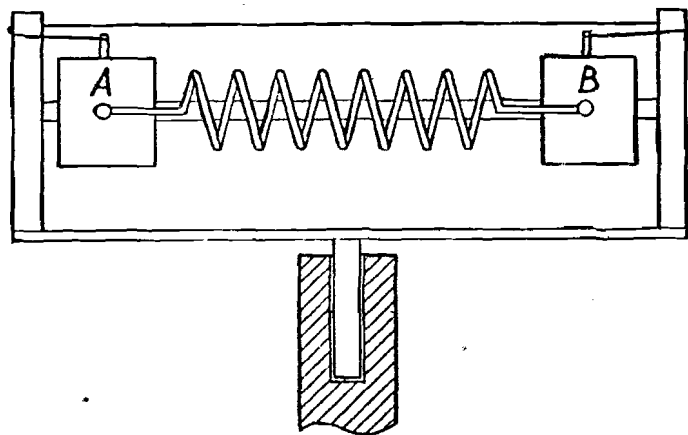


Рис. 8

Вопрос 1. Сохранились ли импульсы, энергия и момент импульса грузов после пережигания нити? Вопрос 2. Как изменилась линейная скорость грузов? Чем объяснить увеличение скорости (с энергетических позиций)?

НЕИНЕРЦИАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОТСЧЕТА

42. Выдергивание тележки из-под тяжелого груза

Показывается необходимость введения сил инерции для использования законов Ньютона в неинерциальной системе отсчета. При выдергивании тележки, связанный с ней наблюдатель "видит", как тяжелый груз начал "сам" двигаться по платформе с ускорением, соскочил с нее и с грохотом упал на стол. Вывод: если вещи начинают бегать "сами", то: а) мы находимся в неинерциальной системе отсчета; б) желая применить законы Ньютона, мы должны вводить дополнительные силы, не связанные с взаимодействием тел и в этом смысле фиктивные, т.е. силы инерции.

43. Отвес на тележке, движущейся с ускорением

Демонстрируется поведение тел в неинерциальной системе отсчета, показывается целесообразность введения сил инерции. При ускоренном движении тележки равновесное положение отвеса оказывается наклонным. Объяснение дается в двух системах отсчета — инерциальной и неинерциальной. Вывод: для использования законов Ньютона в неинерциальной системе отсчета следует ввести силы инерции, направленные противоположно ускорению системы.

Вопрос. Как найти вес тела, находящегося на тележке?

44. Опыты со свободным падением

При обсуждении эквивалентности сил инерции и сил тяготения снова воспроизводится и обсуждается опыт 25.

45. Равенство инертной и гравитационной масс

Показывается способ сравнения масс, предложенный Ньютоном. Шарик из различных материалов (стальной, свинцовый, деревянный), подвешенные на нитях одинаковой длины, совершают колебания с одинаковыми периодами.

46. Отклонение снаряда в неинерциальной системе отсчета

Изучается "свободное" движение тел в неинерциальной системе отсчета. Поясняется искривление луча света в поле тяготения и оценивается величина этого искривления.

Из установленной на тележке пушки стреляют дважды в направлении, перпендикулярном направлению движения тележки: первый раз, когда тележка покоится, второй - когда тележка движется с ускорением (подтягивается за нить рукой или двигателем). При этом снаряд попадает в различные точки мишени, установленной на той же тележке (снаряд покрыт краской и оставляет следы на мишени).

В неинерциальной системе объясняем результат действием сил инерции, в инерциальной - рассматривая относительные перемещения снаряда и тележки: по известной (прямолинейной) траектории снаряда в инерциальной системе находим, с помощью галилеевых преобразований, траекторию в неинерциальной системе, связанной с тележкой. Оба подхода приводят к криволинейной (параболической) траектории снаряда относительно тележки. Оцениваем радиус кривизны траектории: $R = \frac{v^2}{W}$.

Замечая, что рассуждения, проведенные в инерциальной системе отсчета, годятся не только для снаряда, но и для светового импульса, приходим к выводу о криволинейном распространении света в неинерциальной системе отсчета и, следовательно, в поле тяготения.

Вопрос 1. Вычислите радиус кривизны горизонтального луча света вблизи поверхности Земли. **Вопрос 2.** Используя астрономические данные (радиус орбиты Земли $1,5 \cdot 10^{11}$ м, радиус Солнца $7,0 \cdot 10^8$ м), оцените угол отклонения луча света при прохождении вблизи Солнца.

47. Скатывание тележки с отвесом с наклонной плоскости

Опыт, позволяющий продемонстрировать использование эквивалентности сил тяготения и сил инерции в решении физических задач, помочь студентам осмыслить поведение тел в неинерциальных системах отсчета, а также сравнить решения задачи в инерциальной и неинерциальной системах отсчета.

В опыте обнаруживаем, что при скатывании тележки равновесное положение отвеса оказывается перпендикулярным наклонной плоскости, т.е. параллельным силе реакции N наклонной плоскости на тележку.

Объяснение в неинерциальной системе отсчета. В отсутствие опоры тележка свободно падает и отвес находится в состоянии невесомости. Сила реакции N сообщает тележке ускорение $\vec{W} = \vec{N}/M$ (M - масса тележки вместе с отвесом), что, с позиций находящегося на тележке наблюдателя, эквивалентно "включению" поля сил тяготения с напряженностью $\vec{g}_{эф} = -\vec{W} = -\vec{N}/M$. Отвес, очевидно, установится вдоль вектора $\vec{g}_{эф}$ или будет колебаться вблизи этого положения.

Объяснение в инерциальной системе отсчета. Пусть m - масса груза отвеса и T - сила натяжения нити, на которой висит этот груз. Уравнения динамики, записанные для тележки и для груза имеют вид:

$$M\vec{W} = M\vec{g} + \vec{N},$$

$$m\vec{W} = m\vec{g} + \vec{T}.$$

Отсюда сразу следует $\vec{T} = \frac{m}{M}\vec{N}$, а это означает, что нить отвеса параллельна направлению реакции опоры N .

Вопрос. Изобразите действующие на тележку силы с учетом трения в подшипниках колес, затем найдите построенным равновесное положение отвеса.

48. Шарик с пружиной на вращающейся платформе

Показывается проявление центробежных сил инерции, обнаруживаемых по растягиванию закрепленной на платформе пружины шариком, скользящим по стержню, расположенному по диаметру платформы (рис. 9,а).

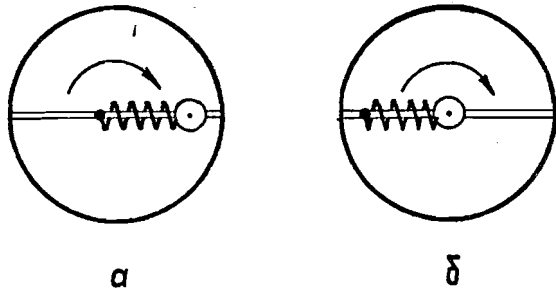


Рис. 9

Вопрос. Опишите поведение шарика при раскручивании платформы, если пружина закреплена так, что при остановленной платформе шарик находится на оси вращения (рис. 9,б). Покажите, что при определенной скорости вращения шарик находится в состоянии безразличного равновесия на любом расстоянии от оси вращения.

49. Отвесы на вращающейся платформе

Исследуется зависимость центробежной силы инерции от скорости вращения и расстояния от оси вращения. Один отвес установлен на оси вращения платформы, два других – на различных расстояниях от оси (рис. 10). Первый отвес не отклоняется при вращении платформы, крайний отклоняется сильнее среднего. Отклонение растет с увеличением скорости вращения платформы.

Вопрос. Оцените угол отклонения отвеса, находящегося в Москве, от направления на центр Земли.

50. Цепочка на вращающемся диске

50.1. Круговая цепочка. Пример системы, поведение которой в неинерциальной системе отсчета описывается легче и нагляднее, чем в инерциальной. Цепочка, сброшенная на стол с быстро вращающегося ($\omega = 50$ Гц) диска, сохраняет форму и катится по столу, перепрыгивая через барьер и т.п. Объяснение

в системе отсчета, вращающейся вместе с цепочкой: цепочка сильно растянута центробежными силами инерции – настолько, что сравнительно небольшая сила реакции стола не может заметно исказить ее форму.

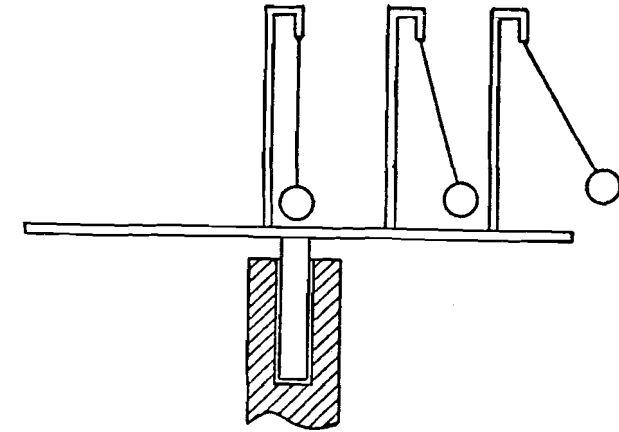


Рис. 10

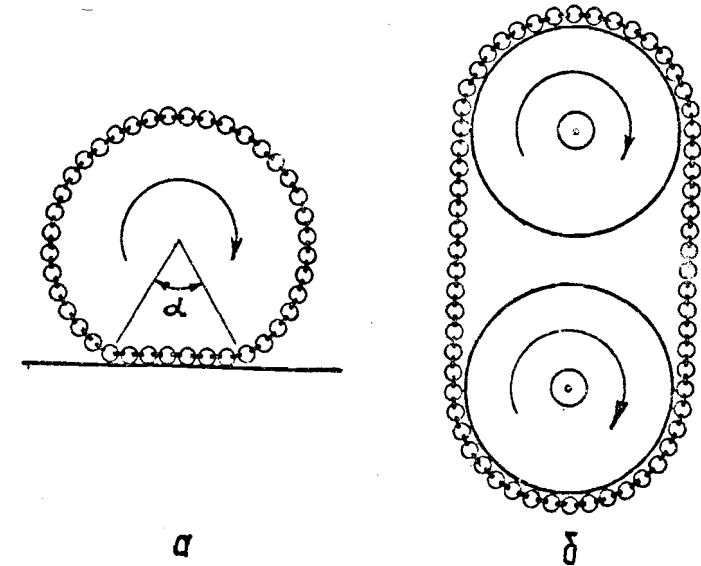


Рис. 11

Вопрос 1. Объясните устойчивость цепочки в инерциальной системе отсчета. Вопрос 2. Оцените угловой размер α (рис. 11,а) участка катящейся цепочки, контактирующего со столом (к объяснению опыта в инерциальной системе отсчета).

50.2. Вытянутая цепочка. Цепочка, раскрученная на двух шкивах (рис. 11,б) после сбрасывания сохраняет свою форму, хотя, с позиций "здравого смысла", она должна была бы быстро принять форму окружности.

Для объяснения заключим мысленно цепочку в гладкую трубу изменяемой длины. Сохранение формы теперь гарантировано. Сохранение энергии требует постоянства скорости звеньев, т.е. отсутствия тангенциальных ускорений, а это означает постоянство силы натяжения цепочки по всей ее длине. Нормальные ускорения сообщаются силами натяжения и реакцией стенок трубы. Меняя длину трубы, можно менять силу натяжения. Установим эту силу равной $T = \rho v^2$, где ρ - линейная плотность (масса на единицу длины) цепочки. Простой расчет показывает, что такая сила как раз достаточна для сообщения нормального ускорения звеньям движущейся цепочки на любом ее участке с произвольным радиусом кривизны R (рис. 12). Следовательно, труба на цепочку не действует и, если трубу убрать, произвольная форма цепочки будет сохраняться. В опыте роль такой трубы выполняли шкивы, задающие начальную форму цепочки.

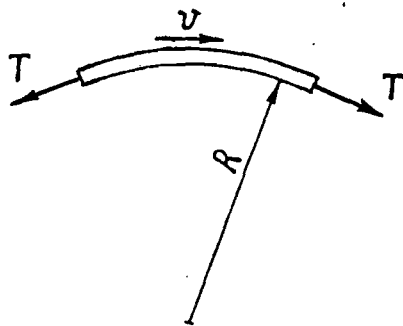


Рис. 12

51. Резка дерева бумажным диском

Аналог опыта 50. Диск из ватмана, вращающийся на валу электродвигателя ($\nu = 50 - 100$ Гц), устойчив настолько, что

режет деревянные палочки. Если вращающийся диск осторожно изогнуть, изгиб бежит некоторое время по диску, сохраняя положение относительно неподвижного наблюдателя - сравните с опытом 50.2.

52. Шарик, катящийся по вращающейся платформе

Показывается проявление кориолисовых сил. Вначале шарик удерживается на равномерно вращающейся платформе магнитом или нитью. Попробуем предсказать его движение относительно платформы после отпускания. На шарик действует центробежная сила, под действием которой он, казалось бы, должен катиться по радиусу платформы. Отпускаем шарик (выключаем магнит или пережигаем нить) и по его следу (шарик покрыт краской или мелом), обнаруживаем искривление траектории относительно платформы. Вывод: в системе отсчета, связанной с платформой, помимо центробежной силы, на шарик действует дополнительная сила, кориолисова, направленная перпендикулярно скорости шарика и возникающая лишь при его движении.

53. Выстрел на вращающейся платформе

Изучается свободное движение во вращающейся системе отсчета и рассматриваются примеры учета сил Кориолиса на практике. Сравниваются результаты наблюдений, проводимых в инерциальной и вращающейся системах отсчета.

Пушка и мишень установлены на диаметре горизонтальной платформы на расстоянии $\ell = 1$ м друг от друга. Произведя выстрел при неподвижной платформе, отмечаем на мишени точку прицеливания. Затем приводим платформу во вращение с частотой $\nu = 1$ Гц и снова производим выстрел. Точка попадания снаряда в мишень оказывается смещенной от точки прицеливания на расстояние $h = 0,2$ м. Результат объясняется сдвигом мишени за время полета снаряда (в инерциальной системе отсчета) или действием сил Кориолиса (в неинерциальной системе отсчета). Проверьте, дают ли оба объяснения одинаковые значения h .

Вопрос 1. Найдите по данным опыта скорость снаряда и сравните ее с результатом опыта 36. Вопрос 2. Предположим, Вы абсолютно точно прицелились в белого медведя, гуля-

ющего вблизи Северного полюса. С какого расстояния вы промахнетесь? Вопрос 3. Тот же вопрос в случае стрельбы вблизи экватора. Сравните результаты выстрелов в направлении экватора или меридиана. Сравните характер промахов (недолет, перелет, отклонение в горизонтальной плоскости) вблизи полюса и вблизи экватора. Вопрос 4. Пусть пушка расположена на оси вращения платформы. Покажите, что траектория снаряда относительно платформы есть архимедова спираль. Опишите, каким увидит движение снаряда наблюдатель, находящийся на платформе. Может ли снаряд попасть в точку прицеливания? Как это будет воспринято наблюдателем на платформе? Вопрос 5. Предложите основанный на рассмотренном явлении селектор скоростей частиц (атомов, молекул и др.) (см. [3], с. 319). Вопрос 6. Установим вместо пушки лазер. Сместится ли след пучка света на мишени при приведении платформы во вращение? Какова форма луча во вращающейся системе отсчета?

Вопрос 7. Установим на мишени зеркало нормально к падающему на нее пучку света (во вращающейся системе). Вернется ли отраженный пучок в лазер?

54. Трубка с водой на вращающемся диске

Изучается зависимость силы Кориолиса от направлений и величин линейной скорости тела и скорости вращения системы отсчета. По диаметру диска протянута заполненная водой резиновая трубка, подключенная через систему уплотнений и распределительное устройство к водопроводу. Приводим диск во вращение и наблюдаем его при стробоскопическом освещении так, чтобы трубка казалась неподвижной. Если течения воды нет, трубка прямолинейна. Заставив воду протекать по трубке, наблюдаем ее изгиб, направление которого меняется при изменении направления течения воды. Затем, не меняя скорость течения воды, останавливаем диск и раскручиваем его в обратном направлении. При торможении диска изгиб трубки уменьшается, при раскручивании появляется изгиб в противоположную сторону.

Вопрос 1. Укажите силы, действующие во вращающейся системе отсчета на малый участок жидкости, текущей по изогнутой трубке. Чему равна векторная сумма этих сил? Вопрос 2. Какой берег подмывают реки в северном полушарии? Вопрос 3. Куда отклонен от вертикали велосипедист, движущий-

ся по Москве на юг? На запад? На восток? Сравните величины этих отклонений. Рассмотрите случаи, когда за вертикальное принимается: а) направление отвеса; б) направление на центр Земли. Заметит ли сам велосипедист эти отклонения?

55. Модель маятника Фуко

Иллюстрируется классический способ обнаружения вращения Земли. Груз с воронкой, заполненной песком, подвешен на нити, закрепленной на кронштейне, установленном на горизонтальной платформе. Платформу приводят во вращение, груз отклоняют и отпускают. Высыпавшийся песок рисует траекторию груза, которая имеет форму звезды (рис. 13,а), если перед отпусканием груз покоился относительно платформы, или набора петель (рис. 13,б), если груз покоился относительно аудитории.

Вопрос. Оцените длину нити маятника, траектория которого на полюсе имеет форму 5-конечной звезды.

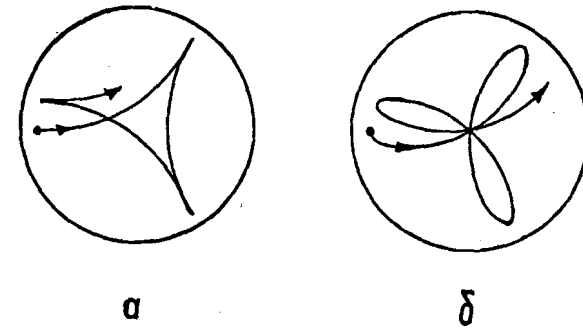


Рис. 13

МЕХАНИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА

56. Ломание палки на бумажных кольцах

Эффектный опыт, убеждающий в недостаточности знания динамики поступательного движения, в необходимости привлечения динамики вращательного движения при описании поведения тел конечных размеров.

Деревянная палка подвешена за концы посредством нескольких бумажных колец. Если на середину палки давить вниз, кольца рвутся. Если же по палке резко ударить металлическим стержнем, палка ломается, а кольца остаются целыми. Объяснение: при резком ударе концы палки, лежавшие на кольцах, движутся не вниз, в направлении удара, а вверх (рис. 14), причем чем больший импульс передан палке, тем "легче" кольцам, так как с большей точностью можно пренебречь взаимодействием половинок палки между собой. Движение половинок палки поясняется контрольным опытом. По концу палки, лежащей на столе, наносят удар перпендикулярно палке, при этом второй ее конец смещается в сторону, противоположную направлению удара.

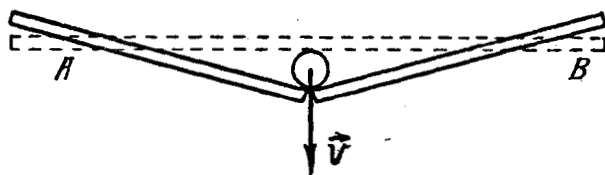


Рис. 14

Встречается неверное объяснение этого опыта: кольца сохраняются вследствие малости полученной палкой импульса $\vec{p} = \vec{F} \Delta t$, обусловленной малостью времени взаимодействия со стержнем Δt . Ошибочность таких рассуждений поясняет рис. 14. Средняя часть палки получит скорость \vec{v} налетающего стержня

(больше палке просто некуда деться), и чем резче удар, тем больше будет переданный импульс, а кольца сохраняются именно при резком ударе. Строгий анализ требует учета гибких колебаний палки.

Вопрос. Найдите положение точек, которые не сместятся при ударе (точки A и B на рис. 14).

57. Скатывание цилиндров с наклонной плоскости

Показываем, что изученные ранее закономерности поступательного движения перестают выполняться, если тела участвуют во вращательном движении. Известно, что ускорение тела при его соскальзывании с наклонной плоскости не зависит от массы, формы и размеров тела и определяется коэффициентом трения и углом наклона плоскости к горизонту. Возьмем теперь два цилиндра одинаковых размеров (проверяется прикладыванием цилиндров друг к другу), одинаковых масс (проверяется взвешиванием) и выкрашенных краской разных цветов, но одного сорта, так что коэффициенты трения цилиндров о наклонную плоскость также одинаковы.

Положим цилиндры на наклонную плоскость и одновременно отпустим их. Цилиндры скатываются с заметно различающимися ускорениями. Показываем, что один цилиндр сплошной, второй — полый. Вывод: ускорение при вращательном движении зависит от распределения массы по объему тела. Одна из характеристик этого распределения — момент инерции.

Вопрос 1. Во сколько раз различаются ускорения цилиндров в отсутствие проскальзывания? Вопрос 2. Покажите, что при достаточно большом (каком?) угле наклона плоскости к горизонту, цилиндры будут спускаться с одинаковыми ускорениями.

58. Движение центра инерции твердого тела

Показываем, что движение центра инерции описывается законами динамики поступательного движения. Кусок картона неправильной формы с нарисованными на нем точками бросаем вверх или под углом к горизонту, сообщив ему одновременно и вращательное движение. Точка, расположенная вблизи центра инерции, движется по параболической траектории и легко на-

блюдается. Другие точки движутся по более сложным траекториям и при наблюдении размазываются.

Показываем пример рассчитанных на ЭВМ траекторий центра инерции и угла чемодана, брошенного с вращением под углом к горизонту (рис. 15).

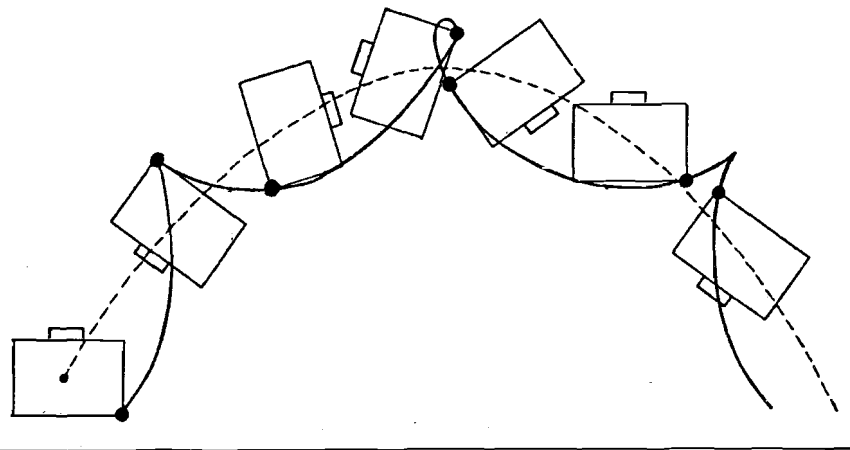


Рис. 15

59. Зависимость углового ускорения от момента сил и момента инерции

Иллюстрируется основное уравнение динамики вращательного движения. Два перемещаемых по горизонтальному стержню груза А и В (рис. 16) могут быть установлены на различных расстояниях от оси вращения легкой рамки, снабженной шкивами разных диаметров. Рамка приводится в движение с помощью гири, подвешенной на нити, намотанной на один из шкивов. Для оценки углового ускорения рамки с грузами измеряем, с помощью секундомера или метронома, время совершения рамкой первого по ее отпусканью оборота. Сравниваем угловые ускорения при различных расстояниях грузов от оси вращения, различных диаметрах шкивов, различных значениях массы гири.

Вопрос 1. По данным опыта оцените, с какой точностью можно считать силу натяжения нити равной действующей на гирю силе тяжести. Вопрос 2. Как изменится время соверше-

ния первого оборота, если расстояние грузов от оси вращения и диаметр шкива увеличить вдвое? Как при этом изменится время опускания гири от начального положения до пола? Вопрос 3. Постройте график зависимости ускорения гири от ее массы.

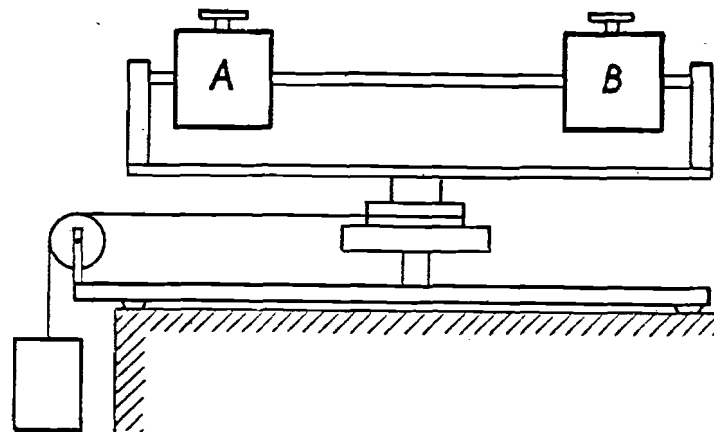


Рис. 16

60. Пушка на вращающейся платформе

Иллюстрируется сохранение момента импульса системы, в которой одно из тел (платформа с пушкой) совершает вращательное движение, а второе (снаряд) – поступательное. Пушка, установленная на краю платформы, способной свободно вращаться вокруг вертикальной оси, стреляет по касательной к краю платформы, при этом платформа с пушкой начинает вращаться. Если снаряд привязать к платформе, вращение прекращается сразу после выстрела – момент импульса замкнутой системы сохраняется.

Вопрос 1. Запишите выражения для момента импульса снаряда и платформы с пушкой относительно оси вращения. Вопрос 2. Сохраняется ли импульс системы при выстреле и каков после выстрела импульс платформы с пушкой, если: а) масса пушки пренебрежимо мала; б) масса пушки сравнима с массой платформы; в) масса платформы пренебрежимо мала?

60. Мотор на вращающейся платформе

Иллюстрируется закон сохранения момента импульса в случае вращательного и сложного (поступательное плюс вращательное) движения тел. Электромотор M , снабженный маховиком, устанавливается на горизонтальной платформе: а) соосно (рис. 17,а), б) со смещением относительно оси вращения платформы (рис. 17,б). При включении двигателя платформа в обоих случаях начинает вращаться в сторону, противоположную вращению маховика.

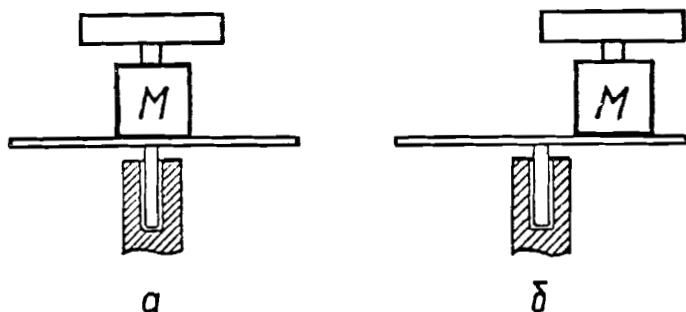


Рис. 17

Вопрос 1. Обсудите сохранение полного момента импульса системы "платформа плюс двигатель с маховиком" и момента импульса относительно оси вращения платформы. Вопрос 2. Запишите выражения для момента импульса маховика и остальной части системы в случаях а) и б). Запишите уравнение закона сохранения момента импульса. Вопрос 3. Куда направлена сумма действующих на систему сил в случае б)?

62. Выстрел кривым снарядом

Опыт с парадоксальным результатом позволяет проверить усвоение студентами закона сохранения момента импульса. Пушка устанавливается по диаметру платформы и заряжается несимметричным снарядом (рис. 18,а). При выстреле такой снаряд начнет быстро вращаться и, казалось бы, закон сохранения момента импульса требует, чтобы платформа начала вра-

щаться в противоположном направлении. Однако платформа остается неподвижной. Объяснение приведено на рис. 18,б. Момент импульса снаряда $I\vec{\omega}$, обусловленный вращательным движением, направлен противоположно моменту импульса $[\vec{r}\vec{p}]$, обусловленному поступательным движением, в результате полный момент импульса снаряда относительно оси вращения платформы равен нулю. Выполнение этого условия обеспечивается подбором ориентации пушки при настройке опыта.

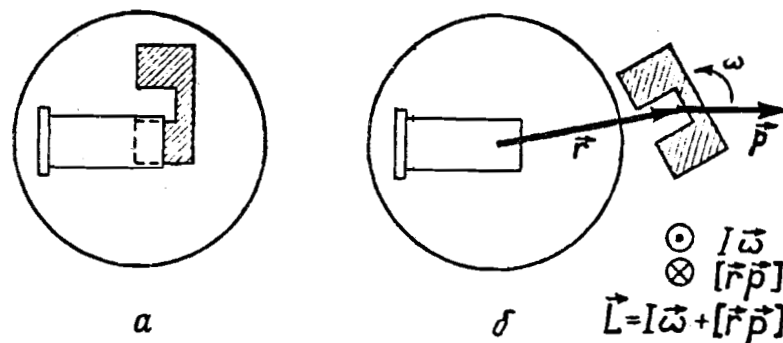


Рис. 18

63. Вращение системы с изменяемым моментом инерции

Выражение $\vec{L} = I\vec{\omega}$ для момента импульса твердого тела неприменимо, вообще говоря, к деформируемому телу, поскольку само понятие угловой скорости применимо лишь к твердому телу. Однако этим выражением можно воспользоваться для начального и конечного состояния тела, когда процесс деформации еще не начался или уже закончился. В результате объясняется следующий опыт. Человек, держащий в разведенных руках гантели, стоит на платформе, вращающейся без трения вокруг вертикальной оси (скамья Жуковского) или сидит на вращающемся стуле. Скорость вращения увеличивается, когда человек опускает руки или прижимает их к груди.

Вопрос 1. Покажите что момент импульса относительно оси вращения равен $I\vec{\omega}$ и в процессе деформации, если элементы тела при деформации движутся в плоскостях, проходящих через эту ось, и вращающихся с одной и той же угловой

скоростью $\vec{\omega}$. Вопрос 2. Как найти угловое ускорение рамки в опыте 41 при заданном движении грузов по стержню?

64. Человек с велосипедным колесом на скамье Жуковского

Векторный характер момента импульса обсуждается на примере системы, у которой момент импульса изменяется, а его проекция на вертикальную ось сохраняется. Человек стоит на скамье Жуковского и держит в руках вращающееся велосипедное колесо, ось которого горизонтальна. Находим направление момента импульса системы и убеждаемся, что момент импульса относительно оси вращения платформы равен нулю. Повернем ось колеса в горизонтальной плоскости. Человек остается неподвижным, направление момента импульса системы изменилось, следовательно, горизонтальная составляющая момента импульса не сохраняется. Установим ось колеса вертикально. Вследствие сохранения вертикальной составляющей момента импульса, человек начинает вращаться. Направление вращения зависит от конечной ориентации оси колеса. Отметим, что полный момент импульса системы стал равным нулю. Вариант опыта: ось колеса вначале вертикальна, затем поворачивается на 90° или 180° .

65. Свободные оси

Серия опытов, дающая представление о закономерностях сложного движения твердого тела, которые подробно в курсе не изучаются.

65.1. Вращение шарнирно-закрепленного стержня. Показываем наличие момента сил при вращении тела (стержня) вокруг произвольной оси и наблюдаем характер движения в отсутствие момента внешних сил. Стержень АВ закреплен на валу OO' так, что может поворачиваться вокруг точки C (рис. 19), и привязан к валу нитью DE . Когда стержень покоится, нить не натянута. При вращении вала OO' нить натягивается, а при дальнейшем увеличении скорости вращения — рвется. Момент

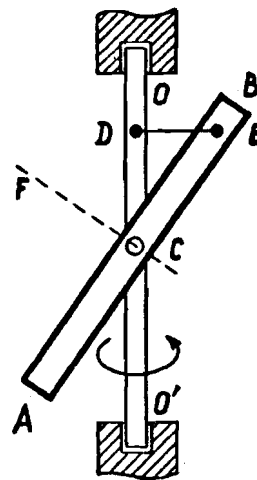


Рис. 19

силы натяжения нити обеспечивает вращение стержня вокруг оси OO' , не являющейся свободной. После обрыва нити стержень начнет вращаться вокруг свободной оси CF , перпендикулярной к стержню. Затем, вследствие трения в подшипниках в точке C , момент импульса стержня и вместе с ним ориентация свободной оси вращения изменяются, и стержень постепенно устанавливается перпендикулярно валу OO' .

Вопрос 1. Найдите направление момента импульса стержня на рис. 19 и момента действующих на него сил. Вопрос 2. Опишите движение стержня до и после обрыва нити в системе отсчета, вращающейся вместе с валом OO' .

65.2. Бросание параллелепипеда.

Момент импульса твердого тела лишь в отдельных случаях параллелен угловой скорости, поэтому сохранение момента импульса при свободном движении не означает сохранения ориентации оси вращения тела, в чем и убеждает опыт. Подбрасывая вверх вращающийся картонный параллелепипед (увеличенный "спичечный коробок"), находим, что вращение вокруг главных осей, соответствующих минимальному и максимальному моментам инерции, является устойчивым, а вращение вокруг оси с промежуточным значением момента инерции — нет (вращение быстро переходит в беспорядочное кувыркание).

65.3. Вращение диска, стержня и цепочки, подвешенных на нити. При наличии внешних сил часто лишь одна из главных осей соответствует устойчивому вращению, в данном опыте — ось с наибольшим моментом инерции. Диск, подвешенный за край, стержень, подвешенный за конец, и замкнутая цепочка в отсутствие вращения располагаются вертикально. Закручивая нить с помощью мотора, на валу которого она закреплена, наблюдаем, как при увеличении скорости вращения тела располагаются почти в горизонтальной плоскости, причем цепочка растягивается в кольцо (рис. 20). Ориентация устойчива и сохраняется, если снять нить с подвеса и подергать за нее.

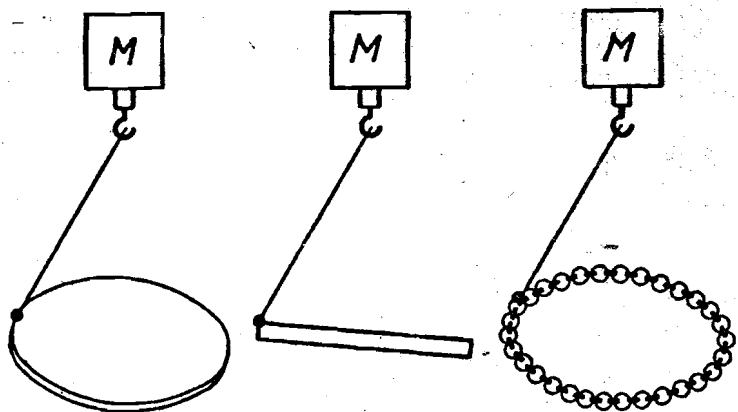


Рис. 20

Вопрос. Покажите, не проводя вычислений, что момент инерции тонкого диска относительно диаметра меньше, чем относительно оси, нормальной к плоскости диска.

65.4. **"Колумбово яйцо"**. Случай, когда устойчиво вращение относительно оси с минимальным моментом инерции. Для того, чтобы деревянное яйцо, повторяющее форму куриного, расположилось на столе вертикально, достаточно сообщить ему быстрое вращение. Результат объясняется действием сил трения. Говорят, Колумб решил эту задачу, надломив скорлупу яйца.

65.5. **"Китайский волчок"**. Поведение известной детской игрушки убеждает в том, что для устойчивости вращения несимметричного тела в присутствии внешних сил важна не только ось вращения, но и ориентация тела на этой оси.

66. Гироскопический эффект

Серия опытов, показывающих необычное поведение быстро вращающегося тела, объясняемое уравнением для момента импульса $\Delta L = M \Delta t$.

66.1. **Юла Максвелла на аркане.** Убеждаемся, что направление поворота оси гироскопа не совпадает с направлением моментов сил. Юла Максвелла - волчок, точка опоры которого расположена выше центра тяжести (рис. 21), благодаря чему

нераскрученный волчок сохраняет вертикальное положение оси. Наденем на ось покоящегося волчка проволочную петлю с привязанной к ней нитью и потянем за нить. Как и следовало ожидать, верхний конец оси переместится вслед за нитью. Определив направление момента внешних сил, находим, что угловая скорость поворота оси параллельна ему.

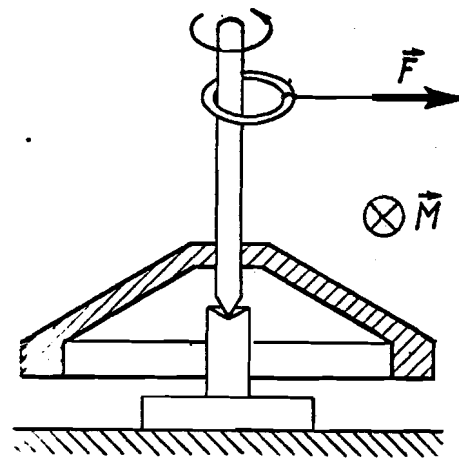


Рис. 21

Такое же воздействие на ось вращающегося волчка приводит к парадоксальному результату: ось смещается перпендикулярно нити и, следовательно, угловое перемещение оси перпендикулярно моменту сил. Для объяснения перепишем соотношение $\Delta L = M \Delta t$ в виде

$$\vec{L}_2 = \vec{L}_1 + \vec{M} \Delta t,$$

где \vec{L}_1 и \vec{L}_2 - начальный и конечный моменты импульса волчка. Если волчок покоится, то $L_1 = 0$ и $L_2 = M \Delta t$, т.е. система будет вращаться в направлении приложенного момента сил (рис. 22,а). Если же $L_1 \neq 0$, непосредственным построением убеждаемся (рис. 22,б), что момент импульса и вместе с ним ось волчка повернется вокруг оси, перпендикулярной моменту сил.

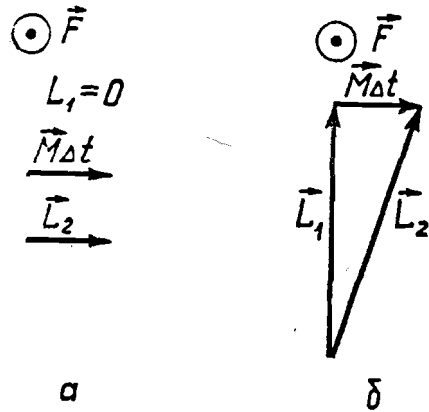


Рис. 22

66.2. Огибание проволочных фигур осью волчка. Эффектное проявление обнаруженных в предыдущем опыте особенностей поведения волчка. Если к оси волчка прикоснуться каким-либо телом (рука, проволочные рамки различных форм), ось начинает перемещаться вдоль границы тела, сильно прижимаясь к нему. При этом конец оси многократно обегает препятствие.

66.3. Опыт с большим гироскопом. Маховик диаметром 0,6 м установлен в кардановом подвесе, надежно закрепленном на столе. Показываем, что внешняя рама подвеса легко поворачивается, затем раскручиваем маховик и просим студента повернуть раму. Это не удается даже с помощью значительных усилий. Вместо поворота рамы наблюдаем поворот оси маховика.

67. Гироскоп в кардановом подвесе

Наличие большого момента импульса обеспечивает устойчивость ориентации оси гироскопа при воздействии на него небольших сил: из рис. 22,б видно, что при очень большом значении L_1 момент сил вызовет весьма малый поворот оси вращения. Гироскоп в кардановом подвесе располагаем на вращающейся платформе и наблюдаем, что при вращении платформы в одну, затем в другую сторону, остановленный гироскоп

поворачивается вместе с платформой вследствие трения в подшипниках подвеса, а вращающийся – сохраняет ориентацию оси вращения. Если долго вращать платформу в одну сторону, ось гироскопа, медленно поворачиваясь, установится вдоль оси вращения платформы – наблюдается прецессия под действием момента сил трения.

68. Велосипед с гироскопом на проволоке

Эффектный опыт, показывающий действие гироскопического стабилизатора. Маховик M , защищенный кожухом, устанавливается на одном (рис. 23,а) или на двух (рис. 23,б) колесах, причем во втором случае обеспечивается свободное вращение опоры маховика в точке A . Получившийся велосипед совершенно неустойчив при покоящемся маховике, а при быстро вращающемся маховике ($\omega \sim 100$ Гц) уверенно катается по проволоке, натянутой в аудитории, даже если эту проволоку раскачивать. Остановив велосипед на проволоке, замечаем, что гироскоп прецессирует.

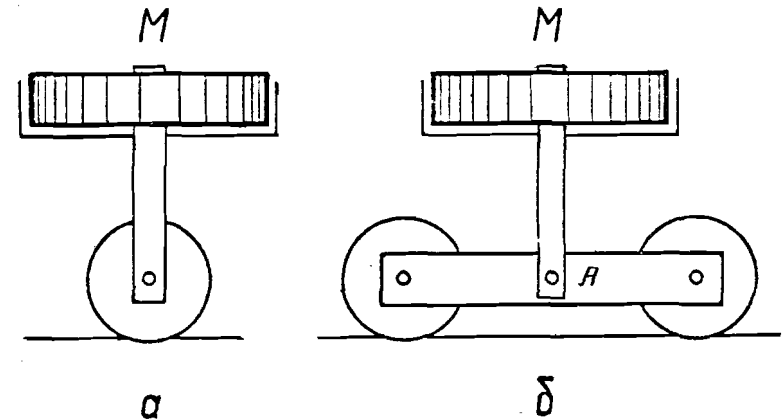


Рис. 23

69. Прецессия гироскопа

69.1. Подвешенный волчок. Изучаем поведение гироскопа, к которому приложена пара сил, сохраняющих величину и направление, и находим, что один из возможных типов движения – регулярная прецессия. Поднимая лежавший на столе маховик

(рис. 24,а) за нить, привязанную к выступающему концу оси, видим, как и следовало ожидать, что центр тяжести маховика оказывается под точкой подвеса (рис. 24,б). Если же маховик предварительно раскрутить (от соприкосновения со столом маховик защищен кожухом), то при подвешивании угол наклона оси к горизонту сохраняется (рис. 24,в) и наблюдается регулярная прецессия, обусловленная действием силы тяжести и силы натяжения нити. Подергивание нити и раскачивание гироскопа на нити мало сказываются на его поведении.

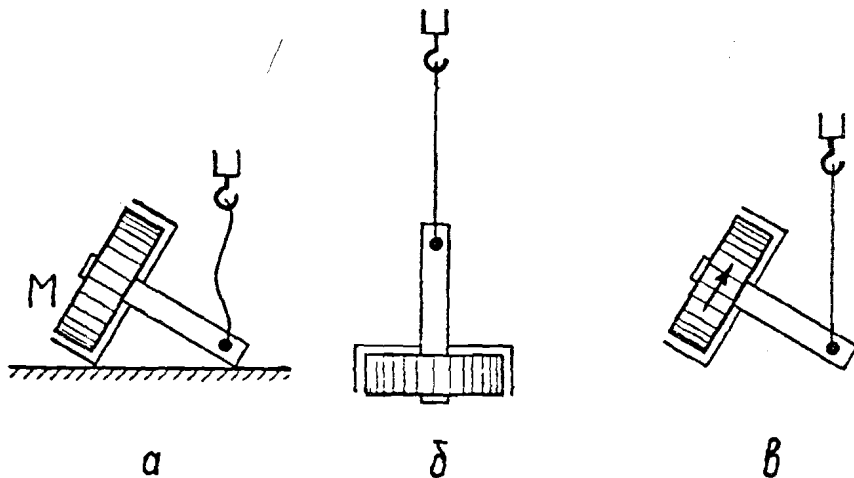


Рис. 24

Вопрос 1. Укажите направление прецессии при указанном на рис. 24,в направлении вращения маховика. **Вопрос 2.** В каком направлении отклонена от вертикали нить подвеса (рис. 24,в)? **Вопрос 3.** Покажите, что пара сил, \vec{F} и $-\vec{F}$, приложенных к оси гироскопа, вызовет регулярную прецессию с угловой скоростью Ω , направленной вдоль одной из этих сил и равной $\Omega = F\ell/L$, где ℓ — расстояние между точками приложения сил, L — момент импульса гироскопа.

69.2. **Прецессия велосипедного колеса.** Аналог опыта 69.1. Колесо раскручивается и подвешивается за выступающий на 0,3 – 0,5 м конец оси.

69.3. **Гироскоп с перегрузками.** Исследуем зависимость угловой скорости прецессии от величины и направления момента приложенных сил. Уравновешенный гироскоп не прецесси-

рует. Смещая размещенные на оси или на рамке гироскопа перегрузки, нарушаем равновесие и наблюдаем прецессию в различных направлениях и с различными скоростями. **Варианты опыта** — с малым или большим гироскопом.

70. Гироскопические силы

Показываем возникновение значительных сил реакции при принудительном повороте оси гироскопа. Конец оси большого гироскопа привязываем нитью АВ к раме карданного подвеса (рис. 25), лишая гироскоп возможности прецессировать. Теперь, в отличие от опыта 66.3, рамка легко поворачивается, но при этом нить АВ сильно натягивается, а при достаточно большой скорости вращения рамы — рвется.

Вопрос. В какую сторону нужно поворачивать раму (см. рис. 25), чтобы оборвать нить?

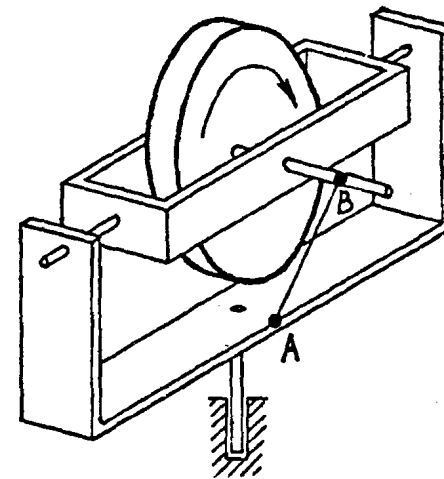


Рис. 25

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Грабовский М. А. и др. Лекционные демонстрации по физике. — М.: Наука, 1972.
2. Перкальскис Б. Ш. Использование современных научных средств в физических демонстрациях. — М.: Наука, 1971.
3. Савельев И. В. Курс общей физики. Т. 1 — М.: Наука, 1977.

Ответственный за выпуск В. П. Дубовской

Редактор И. А. Астаховская
Техн. редактор З. И. Хазова
Корректор В. З. Решетникова

	Подписано в печать	
Формат 60x84 1/16	Объем 3,5 п.л.	Уч.-изд.л. 30
Тираж 200 экз.	Бесплатно	Изд. № 210-2
	Заказ 2230	

Типография МИФИ, Каширское шоссе, 31