

Министерство образования и науки Республики Казахстан
Костанайский государственный университет имени А.Байтурсынова
Кафедра электроэнергетики и физики

М.М. Дунский

ФИЗИКА

Учебно-методическое пособие

Костанай, 2018

УДК 53 (075.8)
ББК 22.3я73
Д 83



Автор:

Дунский Михаил Михайлович, магистр физики, ст. преподаватель кафедры электроэнергетики и физики

Рецензенты:

Джаманбалин Кадыргали Коныспаевич, доктор физико-математических наук, профессор, ректор Костанайского социально-технического университета им.З.Алдамжар

Поезжалов Владимир Михайлович, кандидат физико-математических наук, доцент, профессор КГУ

Иванова Ирина Владимировна – кандидат педагогических наук, старший преподаватель кафедры программного обеспечения

Дунский М.М.

Д83 Физика: Учебно-методическое пособие. – Костанай: КГУ имени А.Байтурсынова, 2018. - 302 с.

ISBN 978-601-7955-32-7



В учебно-методическое пособие включены методические рекомендации по закреплению изученного теоретического материала посредством выполнения практических (лабораторно-практических) заданий с использованием компьютерных моделей физических процессов по некоторым темы курса общей физики.

Предназначено для студентов инженерных специальностей; может быть рекомендовано преподавателям высших учебных заведений при проведении практических учебных занятий по физике.

УДК 53 (075.8)
ББК 22.3я73
Д83

ISBN 978-601-7955-32-7

Утверждено и рекомендовано к изданию Учебно-методическим советом Костанайского государственного университета имени А. Байтурсынова, _____ г, протокол № ____.

©Костанайский государственный
университет имени А.Байтурсынова
©Дунский М.М., 2018

Содержание

Введение	5
Рекомендации по работе с пособием	7
Работа с электронным приложением	10
Практическая часть.....	13
1.1 Равнопеременное движение на примере тела, брошенного под углом к горизонту	13
1.2 Силы трения на примере тела, находящегося на наклонной плоскости	16
1.3 Закон сохранения импульса на примере центрального и нецентрального упругого соударения шаров.....	21
1.4 Свободные и затухающие механические колебания на примере математического маятника	26
1.5 Законы идеальных газов	30
1.6 Реальные газы	37
1.7 Взаимодействие заряженных частиц с электромагнитным полем на примере заряженной частицы в поле плоского воздушного конденсатора	41
1.8 Взаимодействие заряженных частиц с электромагнитным полем на примере движения заряженной частицы в однородном магнитном поле ..	46
1.9 Применение движения заряженных частиц в магнитном поле в работе масс-спектрографа	52
1.10 Электромагнитные колебания на примере свободных и затухающих колебаний в последовательном RLC-контуре	55
1.11 Проверка законов отражения на примере плоского и сферического зеркал	59
1.12 Изучение законов преломления света различными поверхностями ...	65
1.13 Изучение тонкой линзы и системы двух линз	70
1.14 Изучение оптических приборов	77
1.15 Изучение дифракции света	84
1.16 Изучение интерференции света.....	90
1.17 Изучение поляризации света	98
1.18 Изучение фотоэффекта	101
1.19 Изучение ядерных реакций.....	107
Теоретическая часть.....	115
2.1 МЕХАНИКА.....	115
2.1.1 Кинематика движения тел в поле тяжести Земли	115
2.1.2 Трение	121
2.1.3 Закон сохранения импульса.....	126
2.1.4 Механические колебания	134
2.2 МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА.....	141
2.2.1 Эмпирические законы идеальных газов.....	141
2.2.2 Реальные газы	147
2.3 ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ	152
2.3.1 Заряженная частица в электрическом поле.....	152
2.3.2 Частица в магнитном поле	157

2.3.3 Масс-спектрометрия	163
2.3.4 Электромагнитные колебания	171
2.4 ОПТИКА	184
2.4.1 Закон отражения света от различных поверхностей	184
2.4.2 Преломление света различными поверхностями	195
2.4.3 Закон преломления света различными поверхностями.....	209
2.4.4 Оптические приборы на примере микроскопа и телескопа	226
2.4.5 Дифракция света.....	242
2.4.6 Интерференция света	252
2.4.7 Поляризация	262
2.5 КВАНТОВАЯ ФИЗИКА	279
2.5.1 Фотоэффект	279
2.5.2 Ядерные реакции	287
Заключение	299
Список использованных источников	300
Приложение А	301
Приложение Б	302

Введение

Дисциплина «Физика» является базовой дисциплиной обязательного компонента. Важность изучения дисциплины для будущих специалистов в области инженерных наук очень велика, поскольку при решении реальных задач необходимо учитывать физические законы и закономерности. Физика – наука экспериментальная и для её глубокого понимания необходима работа в физической лаборатории с реальными физическими приборами и устройствами. Вместе с тем недостаточное техническое оснащение и необходимость проведения лабораторных работ фронтально противоречат друг другу. Также в учебных планах некоторых специальностей отсутствуют лабораторные занятия по физике. Частичным решением возникшей проблемы является введение в практику виртуальных практических работ, которые не требуют однотипного дорогостоящего оборудования и могут быть реализованы практически в любой аудитории, оснащенной компьютерами, или даже могут быть выполнены студентами дома, т.е. полностью вынесены на самостоятельную работу студента (СРС). Помочь освоить некоторые части курса общей физики призвано данное пособие. Оно охватывает некоторые темы первых трёх разделов, посвящённые механическим, молекулярным и электромагнитным явлениям. Очевидный недостаток выполнения практических работ при помощи компьютера – невозможность изучения реальных приборов и самостоятельной сборки схем компенсируется тем, что получение таких навыков студентам многих профессий и не требуется. Важно изучение самих физических процессов и законов, знание которых пригодится в дальнейшей практической деятельности.

Компьютерный (машинный) эксперимент возник в физической науке в середине XX в. Практически одновременно были разработаны три главных метода моделирования: динамический, вариационный и Монте-Карло. Эти методы нашли широкое применение для исследования различных физических процессов, и с течением времени сформировалась новая наука: вычислительная, или, как её ещё называют, компьютерная, физика. Вычислительная физика занимает промежуточное положение между экспериментальной и теоретической. Подобно теоретической физике она имеет дело с моделями физических систем, созданных на основе ранее полученного знания. Однако в основе вычислительной физики, как и в основе экспериментальной, лежит эксперимент, но не натуральный, а «виртуальный», или компьютерный. При выполнении подобных экспериментов обычно изучаются модели физических систем с реалистичными потенциалами взаимодействия: неидеальные газы, жидкости, кристаллические и аморфные твердые тела, плазма и т.д.

Сравнительно недавно появилась возможность широкого применения методов вычислительной физики в образовательных целях. Этому способствовало несколько факторов, главными из которых были появление большого количества дешевых и доступных персональных компьютеров, развитие машинной графики и возникновение машинной мультипликации,

совершенствование диалогового режима работы пользователя с вычислительной машиной. Все это привело к возможности создания наглядных компьютерных моделей в виде демонстрационного и лабораторного эксперимента, учебных игр и т.п.

Натурные демонстрационные и лабораторные эксперименты совершенно необходимы для изучения физики. При этом компьютерные работы не являются альтернативой реальным, а дополняют их, позволяя изучать при помощи интерактивных моделей недоступные или труднодоступные для реальных опытов явления. При этом можно отметить следующие положительные и отрицательные стороны применения компьютера как средства выполнения виртуальных лабораторных работ:

- Преимущества: возможность использования недоступного оборудования, использование моделей установок разной сложности, точности, стоимости; отсутствие износа, необходимости обслуживания и ремонта; безопасность работы; экономия времени (так как процессы обычно изображаются не в масштабе реального времени) отсутствие вероятности порчи или выхода оборудования из строя; наглядность; в условиях кредитной технологии обучения преимущества особенно заметны, так как позволяют работать студенту в домашних условиях
- Недостатки: неумение использовать физические приборы и оборудование, собирать схемы, не владение методикой измерения и снятия показаний, отсутствие погрешностей измерений (в используемом программном обеспечении) и соответственно незнание студентами математических методов обработки результатов эксперимента (нахождение абсолютной и относительной погрешности, запись результата в принятом виде с учётом найденных погрешностей)

При использовании компьютерных лабораторных работ возникает, как и при использовании любого другого программного обеспечения, возникают трудности с авторскими правами, исключая программные средства, распространяемые свободно и бесплатно.

Несмотря на это использование виртуального лабораторного практикума на специальностях факультета информационных технологий, а это специальности «Информационные системы» и «Вычислительная техника и программное обеспечение», в основном себя оправдывает, т.к.

- навыки работы с физическим оборудованием, сборка схем и т.д. не требуются для этих специальностей

- студенты работают с привычным для них инструментом работы – компьютером и используют его возможности более эффективно, нежели студенты других специальностей

- при изучении физики на данных специальностях важно изучение самих физических процессов и законов, знание которых может пригодиться в дальнейшей практической деятельности

Рекомендации по работе с пособием

Предлагаемое учебно-методическое состоит из двух разделов: практического и теоретического. Такой порядок на первый взгляд может показаться несколько странным, т.к. обычно сначала излагается теория, а затем выполняются практические задания. Однако такой подход выбран для реализации бóльшей самостоятельности в работе студентов и рассчитан на студентов с разным уровнем подготовки. Подготовленный студент может ответить на вопросы входного контроля практически без изучения теоретического материала, изложенного во второй части пособия, и сразу приступить к выполнению практических заданий, т.к. эти вопросы по большей части из школьного курса физики. Для менее подготовленного студента стоит необходимость изучить с той или иной степенью подробности теоретическую часть. Также предполагается, что по мере выполнения работы, студент будет приходить к некоторым выводам и заключениям, которые он не просто прочитает в теории, а сделает сам, что должно способствовать более интенсивной интеллектуальной деятельности. Полученные выводы можно сверить с тем, что даёт теория и, в случае расхождения, объяснить полученные результаты.

В данном пособии содержатся рекомендации по изучению, углублению и закреплению знаний по отдельным темам курса общей физики по таким разделам, как «Механика», «Молекулярная физика» и «Электромагнетизм», «Оптика» и «Квантовая физика». Этот процесс предполагается реализовывать посредством выполнения различных практических заданий с использованием компьютерных моделей реальных физических процессов при помощи электронного приложения, основанного на электронном продукте «Открытая физика 2.5» (части 1 и 2) компании «Физикон». Выполнять все лабораторно-практические работы предлагается по единой схеме, которая включает в себя следующие пункты: 1. Учебная цель работы; 2. Содержание работы; 3. Подготовка к работе; 5. Входной контроль; 6. Порядок выполнения работы; 7. Выходной контроль; 8. Указания в работе (если имеются); 9. Задание на закрепление; 10. Контрольные вопросы и задания.

Перед выполнением практической работы, студент должен подготовить бланк отчёта (см. Приложение А и Б). Бланк отчёта оформляется в бумажном варианте на двойных листах в клетку (пример оформления титульного листа приведён в Приложении А), либо в тетради и содержит следующие пункты (см. Приложение Б): 1. Цель работы – обычно созвучна с названием работы; в ней указывается, что должно явиться результатом выполнения работы; 2. Содержание работы – включает в себя те задачи, которые необходимо выполнить для достижения цели; включает в себя перечисление всех видов

работ, которые содержатся в указаниях к работе (вывести формулу, построить график и т.д.); 3. Основные формулы – это те математические выражения, которые непосредственно используются для определения неизвестных величин. Обычно содержатся в методических указаниях, либо их необходимо вывести (если есть соответствующее задание); также следует расписать все входящие в выражение величины, указать известные и неизвестные; 4. Рисунок или чертёж (по необходимости); 5. Если в практической работе несколько заданий, то необходимо выписать название каждого из них; 6. Таблица – включает в себя все известные величины (постоянные), изменяемые величины и те, которые необходимо найти. Если в работе несколько заданий (а их обычно 2 – 5), то к каждому заданию составляется (либо из методических указаний перечерчивается) своя таблица. После предоставления бланка отчёта следует сдать допуск к работе (вопросы входного контроля) и, если допуск получен, перейти к выполнению заданий при помощи компьютерной модели, используя электронное приложение. Задавая в модели некоторые величины, изменяя другие, получают третьи. Все их необходимо записывать в таблицу. Начальные параметры в лабораторных работах не однотипны в плане числовых значений, а различны у разных студентов, также многовариантны и домашние задания. У каждого студента – свои числовые значения задаваемых величин, которые приводятся в специальных таблицах, где числовое значение берётся в зависимости от номера в списке группы. Этим достигается большая самостоятельность в выполнении студентами всех необходимых расчётов, а также предотвращает списывание. После снятия результатов необходимо подать бланк отчёта на подпись преподавателя. Если в работе имеется задание, в котором необходимо по данным модели рассчитать ещё и дополнительные величины, то седьмым пунктом отчёта будут расчеты этих величин, которые можно приводить не все, а лишь некоторые в качестве примера. Далее, найдя всё необходимое и внося в таблицу, обычно необходимо построить график или графики. График (8) выполняется прямо в бланке отчёта. Можно также начертить график на листке миллиметровой бумаги и вклеить его в отчёт. После выполнения расчётов необходимо также подать на подпись преподавателю. 9. Сделать вывод по каждому заданию – это небольшие выводы к каждому заданию, которые обычно требуют объяснения построенного графика, подтверждение или опровержение полученными результатами выводов теории. 10. Вывод – общий вывод по работе в целом в соответствии с её целью, резюмирующий все выполненные задания. Важно, чтобы в выводе не была простая констатация фактов, типа «я научился измерять ускорение свободного падения», а должно быть указано, что, как и от чего зависит, объяснить причину расхождений с теорией, если они, эти расхождения, наблюдаются. После оформления бланка отчёта необходимо выполнить Задание на закрепление, которое включает в себя задачу и глоссария по теме.

Его выполняют на этом же бланке отчёта после основного вывода по работе. После этого можно перейти к защите, которая включает в себя письменные ответы на вопросы выходного контроля (выполненные в бланке отчёта после домашнего задания) и их устная защита. Всю работу можно оценить следующим образом: ответ на вопросы входного контроля 20%, выполнение измерений, расчеты, построение графиков, выводы – 20%, выполнение домашнего задания – 20%, устная защита – 40%. Если студент сдаёт ответы на контрольные вопросы только в письменном виде без их устной защиты, то за неё ставится 20%.

Работа с электронным приложением

К данному учебно-методическому пособию имеется электронное приложение - учебное издание «Виртуальные лаборатории по физике», при помощи которого необходимо выполнять представленные в пособии практические работы. Учебник разработан при помощи программы AutoPlay Studio 8 с применением языка программирования Java для визуализации реальных физических процессов. Разработчиком компьютерных моделей является компания Физикон и являются частью интерактивных курсов «Открытая физика 2.5. Часть 1» и «Открытая физика 2.5. Часть 2».

Приложение не требует установки. Для начала работы необходимо дважды кликнуть левой кнопкой мыши по исполняемому exe файлу, после чего на экране появился окно загрузки (см. рисунок 1). В течение некоторого времени будет происходить распаковка содержимого учебника во временную папку диска C:.



Рисунок 1 - Окно загрузки электронного приложения

При этом сам учебник может находиться на любом носителе информации и будет доступен без этого носителя после распаковки. Однако после закрытия учебник без носителя будет недоступен.



Рисунок 2 – Титульная страница электронного приложения

После распаковки появится главное окно учебника (см. рисунок 2), в котором отражаются входные данные и имеется кнопка «Содержание».

Меню «Содержание» (см. рисунок 3) открывает перечень виртуальных лабораторий физических процессов, с которыми пользователю предлагается работать. Здесь можно ознакомиться с доступными для изучения явлениями и процессами, а также краткое описание представленных моделей. Учебник содержит 20 интерактивную лабораторию физических процессов и явлений. Из них первые 10 работ соответствуют первой части учебно-методического пособия, включающее разделы «Механика», «Молекулярная физика» и «Электromагнетизм», а вторые 10 лабораторий относятся ко второй части пособия, содержащего раздел «Оптика».



Рисунок 3 – Перечень лабораторий для выполнения практических работ

Окно каждой лаборатории (см. рисунок 4) держит следующие основные элементы: интерактивную модель физического явления, её краткое описание и далее порядок работы с моделью, содержащий определённые задания, которые необходимо выполнить.

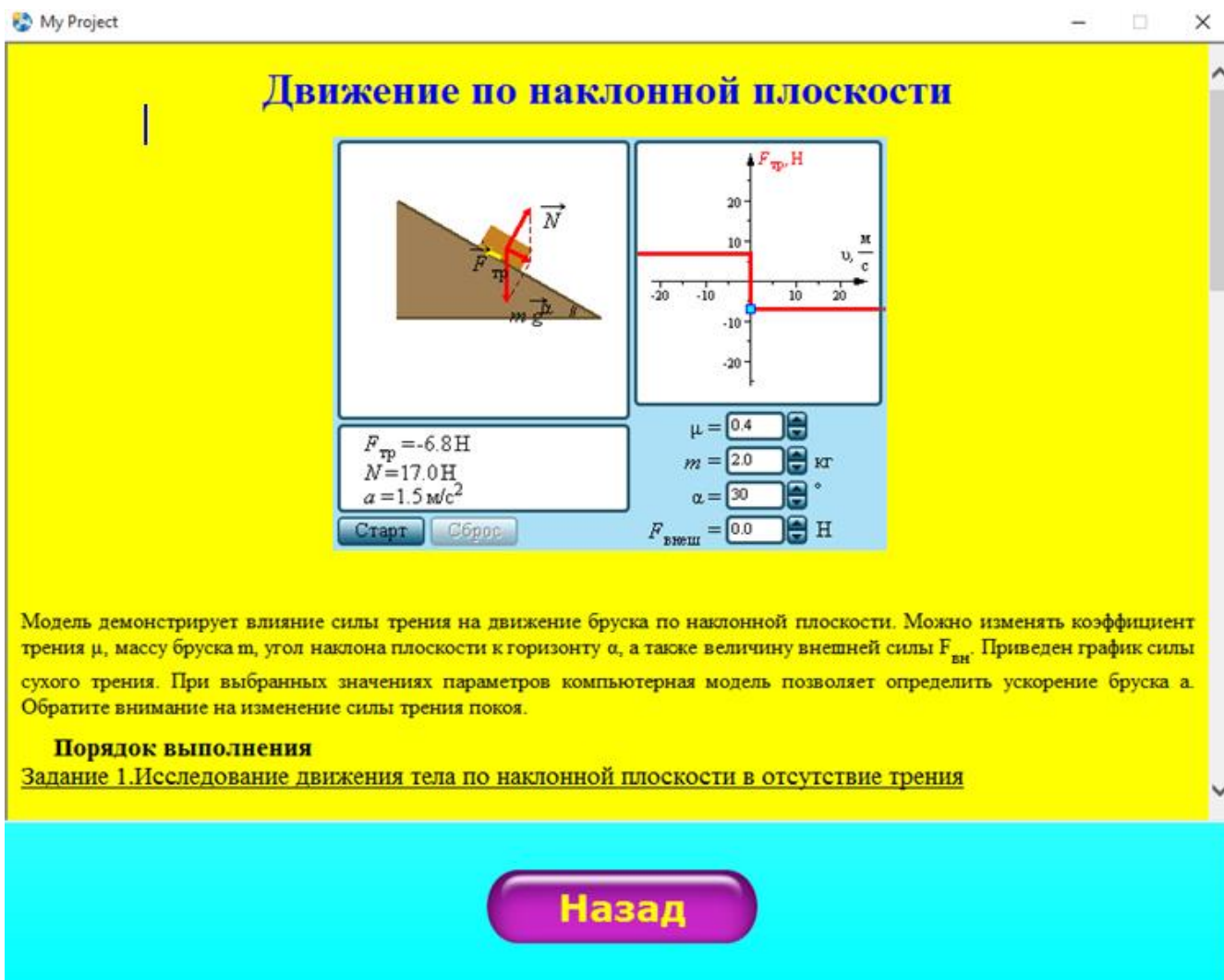


Рисунок 4 – Окно лаборатории, содержащее интерактивную модель физического процесса и перечень заданий для выполнения

Кнопка «Назад» позволяет вернуться в меню лабораторий.

Для корректного отображения Java моделей необходима версия 5.0. Если на компьютере установлена более новая версия, то необходимо сначала удалить её, а затем установить версию 5.0 и запретить автоматическое обновление.

1 Практическая часть

1.1 Равнопеременное движение на примере тела, брошенного под углом к горизонту

Учебная цель работы

Равноускоренное и равнозамедленное движение являются широко распространёнными видами движения. Так движется транспорт, люди, детали машин и механизмов при запуске и остановке. Равнопеременное движение может быть как прямолинейным, так и криволинейным. В работе предлагается изучить законы и поведение тела, совершающего криволинейное равнопеременное движение.

Содержание работы

Изучить равнопеременное движение тела на примере тела, брошенного под углом к горизонту. Построить графики зависимости дальности полёта от угла бросания, времени полёта от начальной скорости и угла бросания, по построенным графикам найти необходимые данные.

Подготовка к работе

Для успешного выполнения и сдачи работы необходимо подготовить бланк отчёта по работе, подготовить ответы на входные вопросы, знать основные определения из кинематики (скорость, ускорение, путь, траектория), законы равноускоренного и равнозамедленного движения.

Входной контроль

1. Какое движение равнопеременным?
2. Какое движение называется прямолинейным? Криволинейным?
3. Что называют траекторией движения?
4. Какие виды равнопеременного движения существуют?
5. Что такое скорость тела? Ускорение?
6. Каковы единицы измерения скорости и ускорения в СИ?
7. Что такое ускорение свободного падения? Чему оно равно на поверхности Земли?
8. Как связаны скорость и ускорение при равнопеременном движении?
9. Запишите уравнение равнопеременного движения?
10. Как направлен вектор ускорения при движении камня, брошенного под углом к горизонту?
11. На какие составляющие можно разложить векторы скорости и ускорения? В чём они измеряются?

Порядок выполнения работы

1. Выбрать систему отсчёта, сделать чертёж
2. Получить формулу для дальности полёта тела

3. Сделать описание модели (см. рисунок 5) согласно Таблице 1

Таблица 1 – Описание компьютерной модели «Движение тела, брошенного под углом к горизонту»

	Величины							
	Задаваемые				Вычисляемые			
Пределы изменения								
Единица измерения								

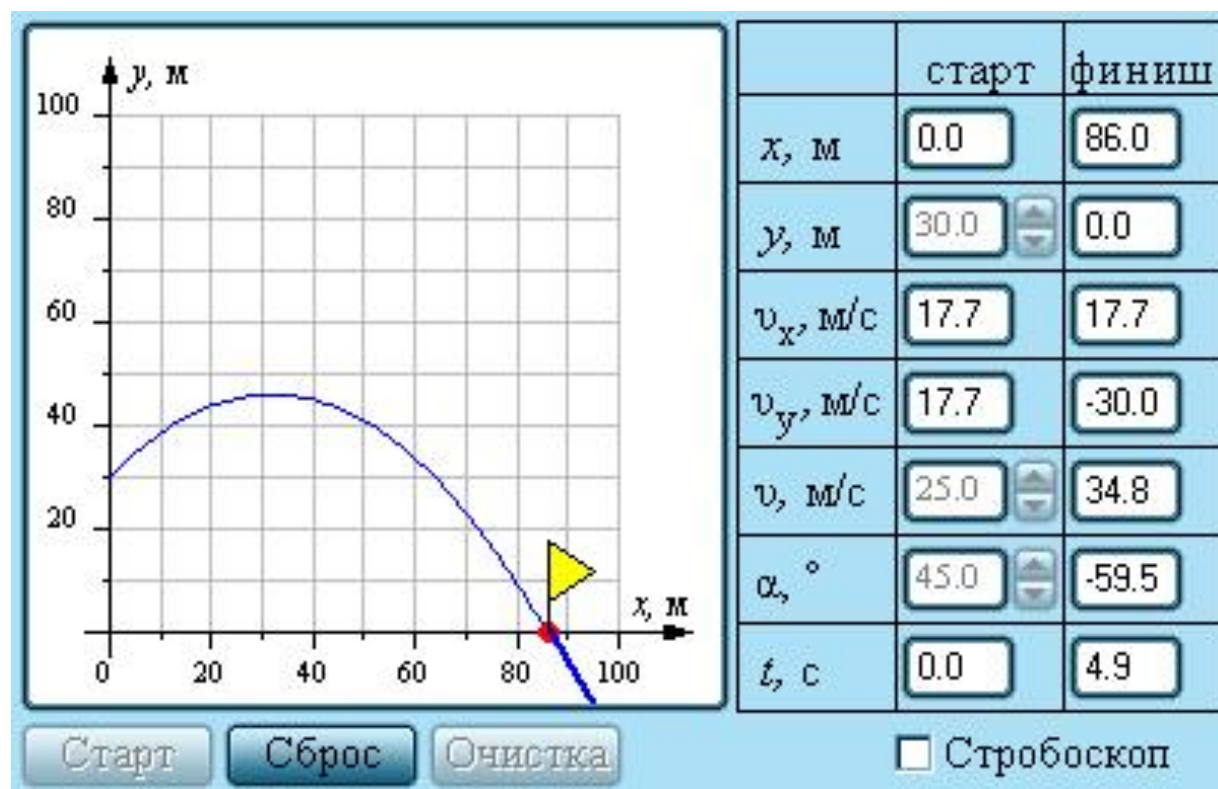


Рисунок 5 – Компьютерная модель «Движение тела, брошенного под углом к горизонту»

4. Задать начальные координаты тела (0,0)
5. Установить первую начальную скорость, задать угол 5 градусов, нажать кнопку «Старт» и наблюдать за движением тела. После приземления записать координату x , которая соответствует дальности полёта тела
6. Не изменяя первой начальной скорости, проделать то же самое для углов 10, 15 и т.д. градусов. Данные записывать в таблицу

Таблица 2 – Исследование зависимости дальности полёта от угла бросания тела

№ п/п	Угол	Скорость 1	Скорость 2	Скорость 3
		Дальность	Дальность	Дальность
1	5			
2	10			
3	15			
4	20			
5	25			
6	30			
7	35			
8	40			
9	45			
10	50			
11	55			
12	60			
13	65			
14	70			
15	75			
16	80			

7. Построить графики зависимости дальности полёта от угла бросания для трёх различных начальных скоростей. Данные взять из таблицы 3 в соответствии со своим вариантом (номером в журнале)

Таблица 3 – Данные о трёх начальных скоростей для разных вариантов

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Начальная скорость	5	12	15	21	27	30	35	42	51	60
	16	34	28	56	8	45	3	11	13	20
	65	50	47	33	61	14	55	28	3	10

8. Сделать вывод о зависимости дальности полёта от угла бросания. Как располагаются кривые в зависимости от начальной скорости?

9. Получить формулу для времени полёта тела.

10. Построить графики зависимости времени полёта от начальной скорости и угла бросания. Данные о начальной скорости взять из таблицы 3 для одного случая. Данные об угле бросания взять из таблицы 4

Таблица 4 – Варианты углов бросания тела

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Угол бросания	10	15	20	30	40	45	50	60	65	70

11. Получить выражение для максимальной высоты подъёма.
12. Рассчитать максимальную высоту подъёма для трёх случаев начальной скорости (Таблица 3) при угле бросания из таблицы 4
13. Найти выражение для зависимости дальности полёта от времени при определённом угле падения. Построить график. Найти по графику положение тела через 1, 3 и 10 с после начала полёта.
14. Получить выражение для траектории движения тела.
15. Сделать выводы по работе

Задание на закрепление

Составить глоссарий по теме «Кинематика» в объёме 15 терминов и решить задачу из сборника задач по физике Чертова, Воробьёва (в соответствии с номером в журнале):

Таблица 5 – Номера задач для самостоятельного решения

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
№ задачи	1.14	1.18	1.24	1.10	1.16	1.23	1.19	1.8	1.22	1.15

Контрольные вопросы и задания

1. Каков характер движения тела в вертикальной плоскости? Горизонтальной? Почему?
2. При каком угле бросания дальность полёта максимальна? Почему?
3. В какой точке траектории вертикальная составляющая скорости равна нулю?
4. С какой скоростью тело упадёт на Землю?
5. Как связаны время подъёма и время падения тела с общим временем полёта? Обоснуйте.
6. Какова траектория движения тела?
7. Что такое тангенциальное ускорение?
8. Что такое нормальное ускорение?
9. Чему равно полное ускорение тела при криволинейном движении?
10. Как соотносятся направления векторов скорости и ускорения при прямолинейном движении? Криволинейном?

1.2 Силы трения на примере тела, находящегося на наклонной плоскости

Учебная цель работы

Трение – один из видов взаимодействия тел, широко распространено в технике и повседневной жизни. Оно возникает при соприкосновении двух тел. Трение, как и все другие виды взаимодействия, подчиняется третьему закону Ньютона: если на одно из тел действует сила трения, то такая же по модулю, но

направленная в противоположную сторону сила действует и на второе тело. Силы трения, как и упругие силы, имеют электромагнитную природу. Они возникают вследствие взаимодействия между атомами и молекулами соприкасающихся тел. Знание законов трения позволяет избежать его вредных последствий в машинах и механизмах путём его уменьшения, а также увеличивать при необходимости. В работе предлагается исследовать поведение тела на наклонной плоскости в зависимости от различных факторов.

Содержание работы

Изучить законы трения, применить второй закон Ньютона к телу, находящемуся на наклонной плоскости, изучить движение тела на наклонной плоскости в зависимости от коэффициента трения, угла подъёма, массы тела и приложенной силы.

Подготовка к работе

Для успешного выполнения и сдачи работы необходимо подготовить бланк отчёта по работе, подготовить ответы на контрольные вопросы, знать основные определения и законы динамики (второй и третий закон Ньютона, масса, сила, сила трения, коэффициент трения), законы трения и виды трения.

Входной контроль

1. Что изучает динамика? Что называют силой?
2. Что такое масса и что она характеризует? Что такое аддитивность массы?
3. Сформулируйте второй и третий законы Ньютона.
4. Что такое сила трения?
5. Какие виды трения бывают?
6. Что показывает коэффициент трения? В чём он измеряется?
7. Запишите закон Кулона для трения. Что такое сила нормальной реакции опоры?
8. В чём заключается закон Амонтона? Для какого вида трения он применим?
9. Какая из сил трения больше: трение покоя, качения или скольжения?
10. Как зависит сила вязкого трения от скорости?

Порядок выполнения работы

1. Сделать описание модели (см. рисунок 6), заполнив таблицу 6

Таблица 6 – Описание компьютерной модели «Тело на наклонной плоскости»

	Величины							
	Задаваемые				Вычисляемые			
Пределы изменения								
Единица измерения								

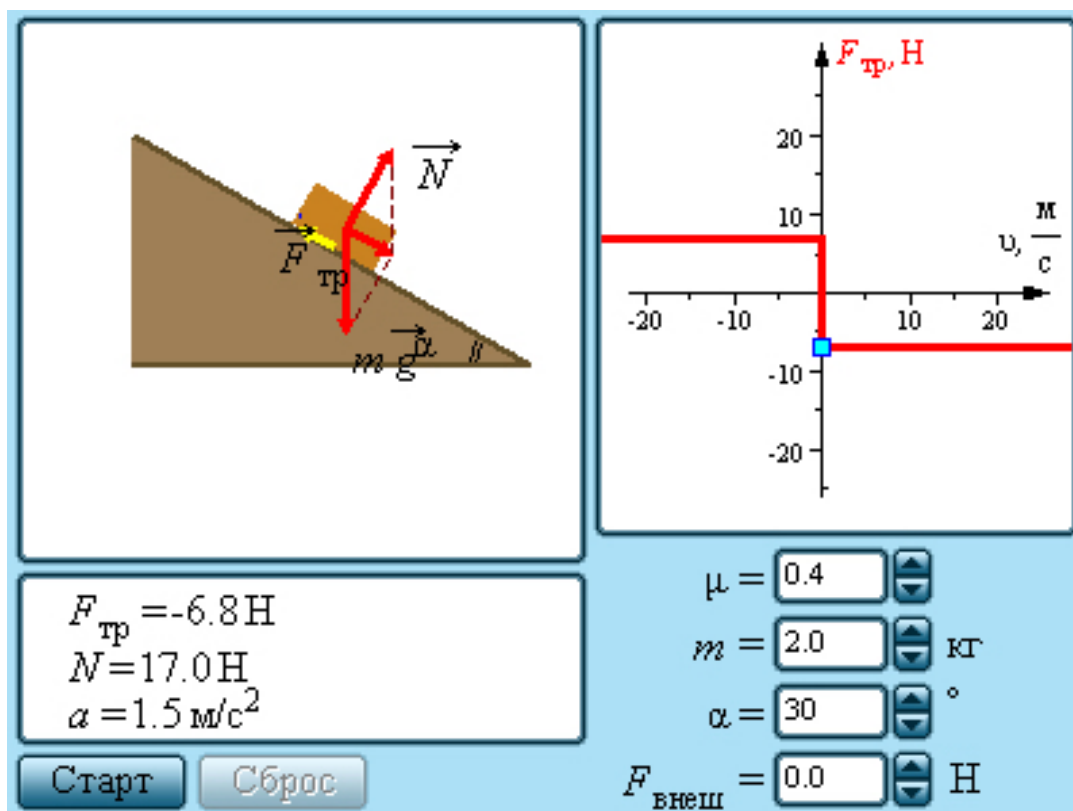


Рисунок 6 – Компьютерная модель «Движение тела по наклонной плоскости»

2. Сделать чертёж тела на наклонной плоскости, выбрать систему координат, указать действующие на тело силы
3. Получить формулу для ускорения тела, движущегося по наклонной плоскости, исходя из второго закона Ньютона и известных действующих на тело сил: силы тяжести, силы трения, силы нормальной реакции опоры
4. Используя полученную формулу для ускорения тела задать входящие в неё величины, используя модель, и определить значение ускорения свободного падения, которое принято в модели
5. Получить выражение для скорости тела. Указать обстоятельства, при которых движение тела будет равномерным
6. Получить выражение, связывающее коэффициент трения и угол наклона плоскости

Задание 1 - Исследование движения тела по наклонной плоскости в отсутствие трения

1. Задать коэффициент трения равный нулю
2. Установить массу тела в соответствии с таблицей 7

Таблица 7 – Масса тела, находящегося на наклонной плоскости

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Масса тела	2	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	3

3. Значения массы записать в таблицу
4. Увеличивая угол наклона плоскости от 5 до 45, записывать значения силы нормальной реакции опоры и ускорения в таблицу

Таблица 8 – Исследование движение тела по наклонной плоскости

№	Масса	Трение	Угол наклона	Ускорение	Сила реакции опоры
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

5. Построить график зависимости ускорения тела от угла наклона в отсутствие трения
6. Сделать вывод

Задание 2 - Исследование движения тела при наличии сил трения

1. Задать любое значение массы тела, записав его в таблицу
2. Установить угол наклона плоскости в соответствие с таблицей 9

Таблица 9 – Угол наклона наклонной плоскости

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Угол наклона	5	10	15	20	25	30	35	40	45

3. Изменяя коэффициент трения от 0 до 0,8 записывать показания силы трения, силы нормальной реакции опоры и ускорения в таблицу
4. По полученным данным построить график зависимости силы трения от коэффициента трения и ускорения тела от коэффициента трения
5. Сделать вывод
6. Установить коэф.трения плоскости в соответствие с таблицей 10

Таблица 10 – Коэффициенты трения между телом и наклонной плоскостью

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8
Коэффициент трения	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8

7. Изменяя угол наклона плоскости записывать значения силы трения, силы нормальной реакции опоры и ускорения в таблицу
8. Построить зависимость ускорения от угла наклона
9. Сделать вывод

Задание 3 - Изучение влияния внешней приложенной силы

1. Задать любую массу тела, записав её в таблицу
2. Установить максимальный коэффициент трения и записать в таблицу
3. Задать минимальный угол наклона 0 и, увеличивая внешнюю приложенную силу от 0 до 10 Н, записывать значения ускорения тела
4. Изменяя угол наклона от 0 до 45 , задавать внешнюю силу от 0 до 10 Н и записывать значения ускорения
5. Сделать вывод о характере движения тела

Указания к работе

Все вычисления необходимо привести в бланке отчёта. Таблицы при этом составить самостоятельно.

Задание на закрепление

Составить глоссарий по теме «Динамика» в объёме 25 терминов и решить задачу из сборника задач по физике Чертова, Воробьёва (в соответствии с номером в журнале):

Таблица 11 – Номера задач для самостоятельного решения

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
№ задачи	2.6	2.2	2.9	2.22	2.4	2.12	2.7	2.1	2.13	2.5

Контрольные вопросы и задания

1. Какие силы действуют на тело, находящееся на наклонной плоскости?
2. Начертить и объяснить график зависимости скорости тела от силы трения?
3. Как зависит сила трения от угла наклона плоскости?
4. Как зависит ускорение тела от его массы и от угла наклона плоскости?
5. Какое максимальное значение ускорения достигается в работе и при каких условиях? Максимальное значение силы трения?
6. В чём измеряется сила нормальной реакции опоры? Что такое явление и область застоя?
7. От каких факторов зависит трение между поверхностями? Коэффициент трения?
8. Какими способами можно уменьшить силы трения? Где это необходимо?
9. В каких случаях силу трения необходимо увеличивать?
10. В каких единицах изменяется сила в СИ? В СГС? Какова её размерность в СИ?

1.3 Закон сохранения импульса на примере центрального и нецентрального упругого соударения шаров

Учебная цель работы

Ударом (или **столкновением**) принято называть кратковременное взаимодействие тел, в результате которого их скорости испытывают значительные изменения. Во время столкновения тел между ними действуют кратковременные ударные силы, величина которых, как правило, неизвестна. Поэтому нельзя рассматривать ударное взаимодействие непосредственно с помощью законов Ньютона. Применение законов сохранения энергии и импульса во многих случаях позволяет исключить из рассмотрения сам процесс столкновения и получить связь между скоростями тел до и после столкновения, минуя все промежуточные значения этих величин.

Содержание работы

Изучить законы упругих соударений шаров, рассматривая центральный и нецентральные удары идеально гладких шаров. Построить графики зависимости углов разлёта шаров от скорости налетающего шара при определённом прицельном расстоянии; скорости второго шара в зависимости от скорости первого; скорости второго шара от прицельного расстояния при заданной скорости первого шара.

Подготовка к работе

Для успешного выполнения и сдачи работы необходимо подготовить бланк отчёта по работе, подготовить ответы на контрольные вопросы, знать понятия энергии, импульса, виды механической энергии, законы сохранения энергии и импульса.

Входной контроль

1. Что такое удар?
2. Какие виды ударов существуют?
3. Какой удар называют центральным? Нецентральным?
4. Что такое прицельное расстояние?
5. Что такое линия центров?
6. Какие законы сохранения соблюдаются при соударениях?
7. Какие параметры задаются в модели соударения упругих шаров?
8. Какие величины рассчитываются в модели?
9. Что такое система центра масс? Лабораторная система?
10. Реализуются ли на практике абсолютно упругие удары тел? Почему?

Порядок выполнения работы

1. Выбрать систему отсчёта, сделать чертёж центрального и нецентрального ударов. Рассмотреть все возможные случаи взаимного движения шаров

2. Сделать описание модели при помощи таблицы 12 (см. рисунок 7)

Таблица –12 Описание компьютерной модели «Столкновения упругих шаров»

	Величины							
	Задаваемые				Вычисляемые			
Пределы изменения								
Единица измерения								

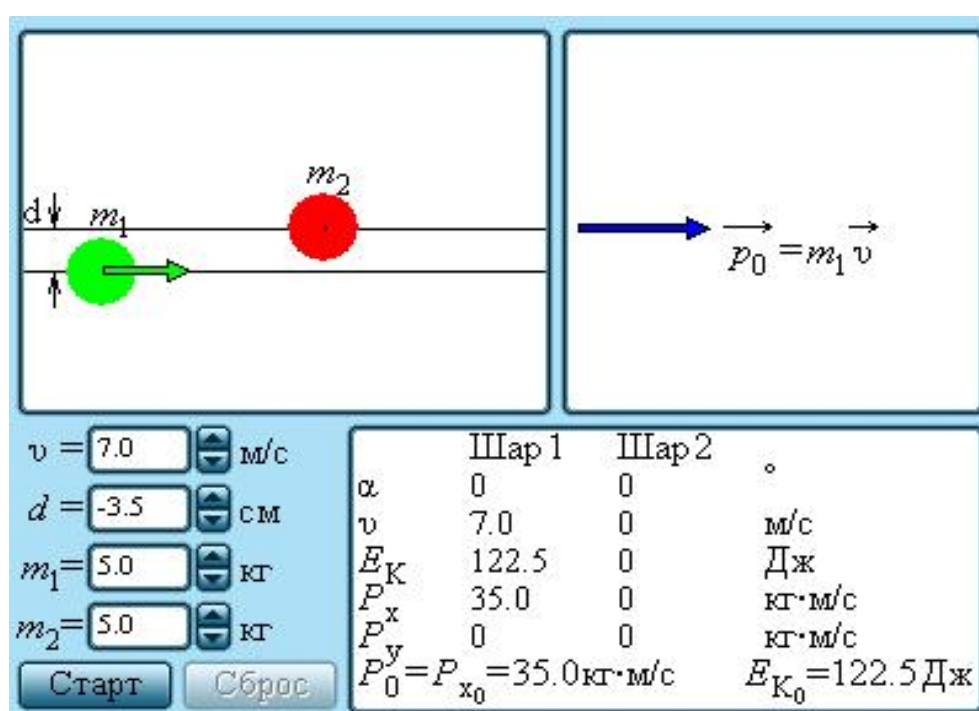


Рисунок 7 – Компьютерная модель «Столкновения упругих шаров»

3. Задать произвольно массы обоих шаров

4. Построить графики зависимости углов разлёта (в одной плоскости) от скорости первого шара. Данные о прицельном расстоянии взять из таблицы 13 в соответствии со своим вариантом (номером в журнале). При этом не имеет значение положительное это значение или отрицательное, т.к. прицельное расстояние симметрично относительно линии центров шаров

Таблица 13 – Значения прицельного расстояния

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Прицельное расстояние, м	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5

5. Данные занести в таблицу 14

Таблица 14 – Исследование углов разлёта шаров в зависимости от скорости налетающего шара

№	m1, кг	m2, кг	Прицельное расстояние, см	V1, м/с	Угол1	Угол2
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						

6. Сделать вывод о зависимости углов разлёта шаров от скорости налетающего шара

7. Задать произвольные массы шаров. Для номеров 1-5 взять $m_1 > m_2$, для номеров 6-10 – $m_2 < m_1$

8. Построить график зависимости скорости второго шара от скорости первого. Прицельное расстояние взять из таблицы 1

9. Данные занести в таблицу 15

Таблица 15 - Исследование соударений шаров в зависимости от скорости налетающего шара

№	m1, кг	m2, кг	Прицельное расстояние, см	V1, м/с	V2, м/с
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

10. Построить график зависимости скорости второго шара от прицельного расстояния при постоянной скорости налетающего шара.

Прицельное расстояние брать либо для положительных, либо для отрицательных значений с шагом 0,5 см. Данные о скорости первого шара взять из таблицы

Таблица 16 – Значения скорости налетающего шара

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Скорость V_1 , м/с	7	6	5	4	3	3	4	5	6	7

11. Данные занести в таблицы 17

Таблица 17 – Исследование зависимости скорости второго шара от скорости первого

№	m_1 , кг	m_2 , кг	V_1 , м/с	Прицельное расстояние, см	V_2 , м/с
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

12. Сделать вывод о зависимости скорости второго шара от прицельного расстояния

13. Задать прицельное расстояние равное нулю (для реализации центрального удара)

14. Задать произвольное значение скорости налетающего шара V_1

15. Для номеров 1-5 придать m_1 максимальное значение, а m_2 – минимальное. Уменьшая массу первого шара записывать значения скорости второго шара. Построить график зависимости скорости второго шара от массы первого шара (при $m_2 = \text{const}$). Скорость налетающего шара при этом изменять не нужно

16. Для номеров 6-10 придать m_1 - минимальное значение, а m_2 – максимальное. Увеличивая массу первого шара записывать его скорость. Построить график зависимости скорости второго шара от его массы (при $m_1 = \text{const}$, $V_1 = \text{const}$)

17. Данные занести в таблицу 18

Таблица 18 – Исследование зависимости скорости второго шара от его массы

№	m1, кг	m2, кг	V1, м/с	V2, м/с
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

18. Сделать выводы качественные выводы о движении и взаимодействии шаров

Задание на закрепление

Составить глоссарий по теме «Законы сохранения. Работа. Энергия» в объёме 15 терминов и решить задачу из сборника задач по физике Чертова, Воробьёва (в соответствии с номером в журнале):

Таблица19 – Номера задач для самостоятельного решения

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
№ задачи	2.38	2.76	2.61	2.34	2.67	2.62	2.35	2.63	2.58	2.39

Контрольные вопросы и задания

1. Какая физическая величина называется импульсом? В чём он измеряется?
2. Сформулируйте закон сохранения импульса. Для каких систем он справедлив?
3. Что такое энергия? Какие виды энергии вы знаете?
4. Какие виды энергии относятся к механической?
5. Сформулируйте закон сохранения механической энергии.
6. Запишите закон сохранения энергии и импульса для неупругого соударения тел.
7. Запишите закон сохранения энергии и импульса для упругого соударения тел для двух случаев: 1. Первый шар налетает на второй, который покоился; 2. Один шар нагоняет другой
8. Каков результат упругого столкновения двух шаров одинаковой массы?
9. Что произойдёт при взаимодействии идеально упругих шаров, масса одного из которых бесконечно велика?

10. Начертите диаграмму импульсов для упругого столкновения шаров при абсолютно упругом центральном и нецентральных ударах.
11. Что такое баллистический маятник? Запишите для него законы сохранения.

1.4 Свободные и затухающие механические колебания на примере математического маятника

Учебная цель занятия

Многие физические процессы сводятся к исследованию поведения системы при небольших отклонениях от равновесного состояния, в котором она пребывает. При этом система будет совершать колебания. Колебания – это процесс, отличающийся той или иной степенью повторяемости. В зависимости от физической природы повторяющегося процесса рассматривают механические, электромагнитные, электромеханические и др. колебания. Колебания широко распространены в природе и технике. Во многих случаях они играют отрицательную роль. Например, колебания моста, возникающее из-за толчков, сообщаемых ему колёсами поезда при прохождении через стыки рельсов, колебания корпуса корабля, вызываемые колебаниями гребного винта, вибрации крыльев самолёта – всё это процессы, которые могут привести к катастрофическим последствиям. В подобных случаях задача заключается в том, чтобы предотвратить возникновение или во всяком случае воспрепятствовать тому, чтобы колебания достигли опасных размеров. Вместе с тем, колебательные процессы лежат в самой основе различных отраслей техники. Так, на колебательных процессах основана вся радиотехника. В настоящей работе предлагается изучить простейший вид колебаний – механические – на примере математического маятника.

Содержание работы

Исследовать математическую модель математического маятника, который может совершать затухающие и незатухающие колебания. Изменяя значения, коэффициента трения, угла отклонения и длины маятника, определить значение постоянной ускорения свободного падения, используемого в модели; выяснить зависимость периода свободных колебаний от угла отклонения и от длины нити маятника; проанализировать ход кривых смещения и скорости при затухающих колебаниях.

Подготовка к работе

Для успешного выполнения и сдачи работы необходимо подготовить бланк отчёта по работе, подготовить ответы на контрольные вопросы, знать основные определения из кинематики и динамики колебаний

Входной контроль

1. Что такое математический маятник?

2. Какие процессы называются периодическими? Приведите примеры.
3. Какие колебания называются малыми? Почему имеет значение малость колебаний?
4. На какой угол необходимо отклонить маятник, чтобы колебания считались малыми?
5. Какие колебания называются гармоническими? Ангармоническими?
6. Какие колебания изучаются в работе?
7. Что такое полное колебание? Что такое период? В чём он измеряется?
8. Как можно определить период колебаний математического маятника?
9. Что называют незатухающими колебаниями? затухающими?
10. Изобразите схематически графики затухающих и незатухающих колебаний.

Порядок выполнения работы

1. Сделать описание компьютерной модели по таблице 20 (см. рисунок 8)

Таблица 20 – Описание компьютерной модели «Математический маятник»

	Величины							
	Задаваемые				Вычисляемые			
Пределы изменения								
Единица измерения								

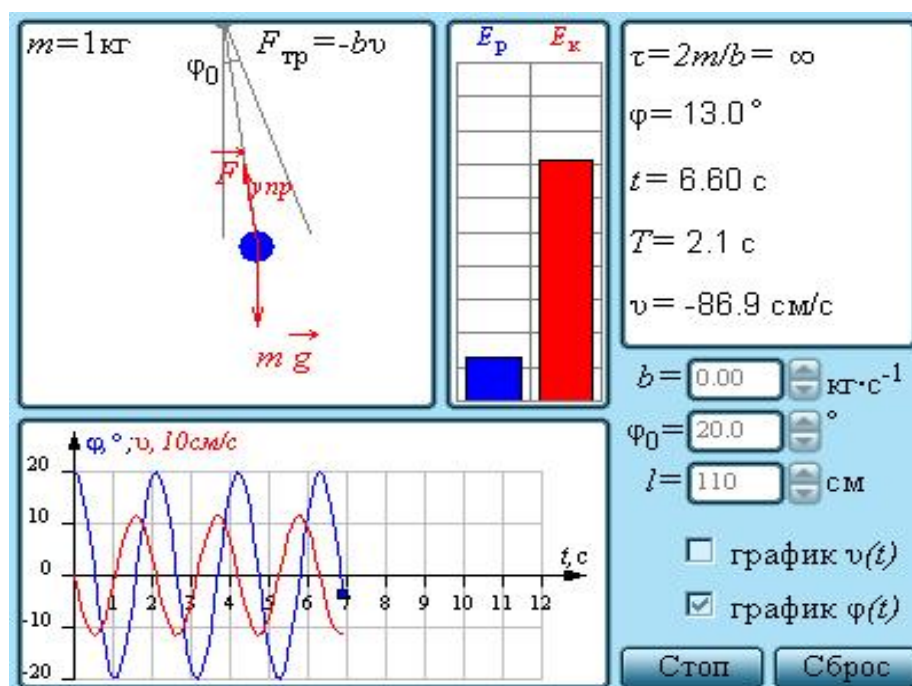


Рисунок 8 – Компьютерная модель «Математический маятник»

2. Начертить математический маятник и показать действующие на него силы
3. Получить уравнение движения математического маятника
4. Получить выражение для периода свободных колебаний математического маятника
5. Найти максимальную скорость движения маятника исходя из закона сохранения энергии

Задание 1 - Исследование свободных колебаний математического маятника

1. Для исследования свободных колебаний маятника установить коэффициент трения, равны нулю
2. Задать угол отклонения маятника, в соответствии с таблицей 21

Таблица 21 – Углы начального отклонения маятника от положения равновесия

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Угол	10	11	12	13	14	15	16	17	18	20

3. Нажать кнопку «Старт» и записать значение периода колебаний маятника, которое отображается в правом верхнем окне
4. Изменяя длину нити, записывать в таблицу значения периода колебаний.
5. Зная период колебаний и длину нити, рассчитать значение постоянной свободного падения, принятой в модели. Рассчитать погрешность принятого в модели значения ускорения свободного падения с известным табличным значением (для широты 56 градусов)

Таблица 22 – Исследование свободных колебаний математического маятника

№	Угол	Длина нити	Период	Ускорение свободного падения	Погрешность
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					

6. Построить график зависимости периода колебаний от длины нити
7. Сделать вывод о зависимости периода малых колебаний маятника от длины нити.
8. Задать определённую длину нити, в соответствие с таблицей 23

Таблица 23 – Длина нити маятника

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Длина нити	130	124	118	114	110	106	102	98	94	90

9. Изменяя угол отклонения маятника, записывать значения периода колебаний
10. Построить график зависимости периода колебаний от угла отклонения
11. Используя график зависимости скорости маятника от времени, приведённый в модели, составить таблицу значения скорости для моментов времени 1, 3, 7, 10, 11 и 12 с.
12. Сделать вывод об изменении скорости движения маятника от времени.

Задание 2 - Изучение затухающих колебаний математического маятника

1. Установить значение коэффициента трения, в соответствие с таблицей 24

Таблица 24 – Коэффициенты трения для исследования затухающих колебаний

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Коэффициент трения	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	1,1	1,4	1,6	1,8	2

2. Задать угол отклонения (таблица 21)
3. Изменяя длину нити, записывать значения времени колебаний
4. Сделать вывод о зависимости времени колебаний от длины нити
5. Задать угол отклонения маятника (таблица 21)
6. Установить длину нити (Таблица 22)
7. Изменяя коэффициент трения, записывать значения времени колебаний
8. Построить график зависимости времени колебаний от коэффициента трения
9. Сделать вывод

10. Используя график зависимости угла отклонения от времени, приведённого в модели, начертить на одной координатной плоскости два графика при максимальном и минимальном (не равном нулю) коэффициентах трения

Указания к работе

Все вычисления необходимо привести в бланке отчёта. Таблицы при этом составить самостоятельно.

Задание на закрепление

Составить глоссарий по теме «Механические колебания» в объёме 15 терминов и решить задачу из сборника задач по физике Чертова, Воробьёва (в соответствии с номером в журнале):

Таблица 25 – Номера задач для самостоятельного решения

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
№ задачи	6.33	6.2	6.36	6.39	6.1	6.37	6.34	6.8	6.38	6.13

Выходной контроль

1. Чему равна кинетическая энергия свободных колебаний? Потенциальная?
2. Как определяется полная энергия механических колебаний? Как она изменяется в случае затухающих и незатухающих колебаний?
3. Покажите силы, действующие на математический маятник в случае затухающих и незатухающих колебаний.
4. Какой формулой определяется период колебаний математического маятника. Как он зависит от массы груз?
5. Как определяется скорость и ускорение при гармонических колебаниях?
6. Какими величинами полностью характеризуется гармоническое колебание?
7. Вывести уравнение движение математического маятника.
8. Что такое циклическая частота? Амплитуда? Фаза колебания? Начальная фаза? От чего зависит частота колебания?
9. Запишите уравнение движения маятника в случае наличия силы трения. Что такое декремент затухания?
10. Какие колебания называют вынужденными? Автоколебаниями?

1.5 Законы идеальных газов

Учебная цель работы

Идеальный газ – это модель газа, в которой пренебрегается взаимодействием между молекулами и их объёмом. Законы идеальных газов

были установлены эмпирически в 17-19 веках. Они справедливы для не слишком плотных реальных газов. В данной работе предлагается изучить законы идеальных газов для изопроцессов. Изопроцессами называются такие термодинамические процессы, при котором один из термодинамических параметров, характеризующих состояние газа, остаётся неизменным. Так как состояние газа обычно характеризуется тремя термодинамическими параметрами: объёмом, давлением и температурой, то соответствующими изопроцессами будут: изохорный, изобарный и изотермический. К изопроцессам также относят адиабатный процесс. Все эти процессы объединяют общим термином политропный (политропический) процесс.

Содержание работы

Изучить различные изопроцессы, происходящие с идеальным газом. Построить соответствующие графики зависимости параметров идеального газа.

Подготовка к работе

Для успешного выполнения и сдачи работы необходимо подготовить бланк отчёта по работе, подготовить ответы на контрольные вопросы, знать понятия энергии, импульса, виды механической энергии, законы сохранения энергии и импульса.

Входной контроль

1. Что такое идеальный газ? Применима ли эта модель к реальным газам?
2. Какими параметрами характеризуется состояние газа?
3. Что такое термодинамический процесс? Квазистатический процесс?
4. Какой термодинамический процесс называется равновесным? Неравновесным?
5. Что такое время релаксации?
6. Какие процессы называются изопроцессами?
7. Сформулируйте закон Бойля-Мариотта. Для какого процесса он применим?
8. Сформулируйте закон Гей-Люссака. Для какого процесса он применим?
9. Сформулируйте закон Шарля. Для какого процесса он применим?
10. Получите законы идеальных газов из уравнения Менделеева-Клапейрона.

Порядок выполнения работы

Задание 1 - Изучение изотермического процесса

1. Сделать описание компьютерной модели согласно таблицы 26(см. рисунок 9)
2. Как получается уравнение для изотермического процесса из уравнения политропы?
3. Задать температуру газа, взяв значение из таблицы 27 в соответствии со своим вариантом (номером в журнале). Для первой серии опытов взять первое значение

Таблица 26 – Описание компьютерной модели «Изотермический процесс»

	Величины							
	Задаваемые				Вычисляемые			
Пределы изменения								
Единица измерения								

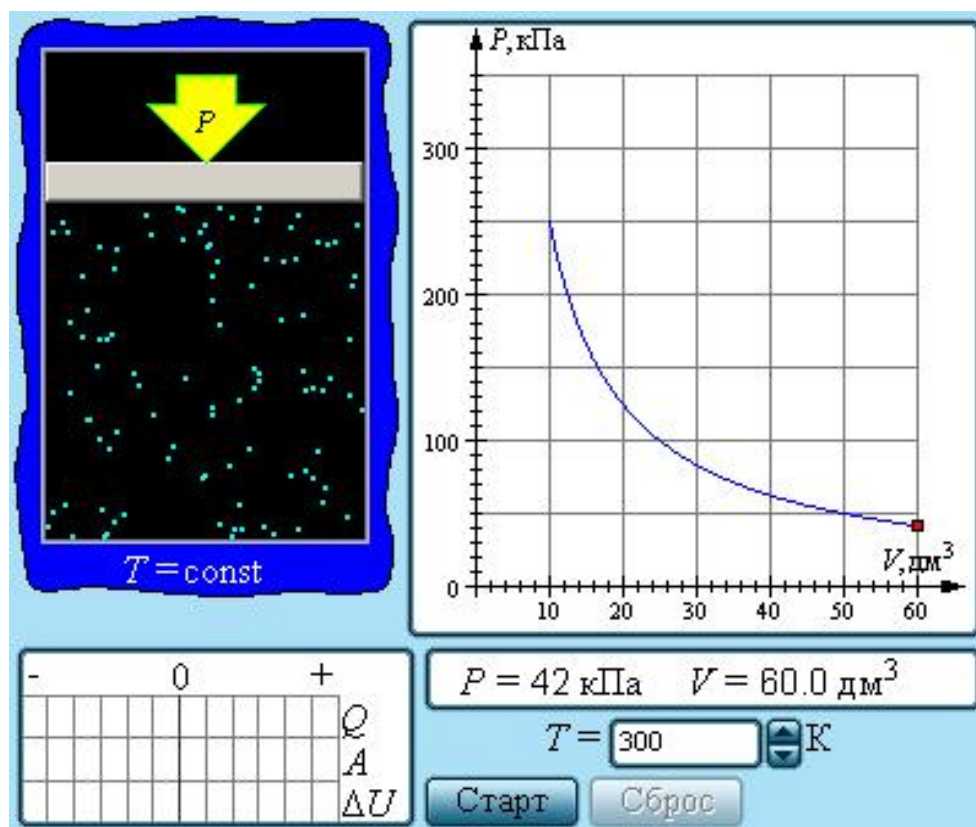


Рисунок 9 - Компьютерная модель «Изотермический процесс»

Таблица 27 – Температуры газа для построения семейства изотерм

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Температура газа	200	205	210	215	220	225	230	235	240	245
	250	255	260	265	270	275	280	285	290	295
	300	305	310	315	320	325	330	335	340	345

4. Кратковременно нажимая кнопку «Старт»/»Стоп» на модели записывать значения давления и объёма газа в таблицу 28
5. Построить графики зависимости давления от объёма при трёх различных начальных температурах (1, 2 и 3 – семейство изотерм) в осях (p,V), а также в осях (p,T) или (V,T)
6. Рассчитайте работу газа для значения температуры, равной средней арифметической ваших температур. Для этого используйте максимальное и

минимальное значение объёма (первый расчёт) и давления (второй расчёт).

Сравните результаты

Таблица 28 – Исследование изотермического процесса

Параметр/№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Температура	Температура 1								
Давление									
Объём									
Параметр/№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Температура	Температура 2								
Давление									
Объём									
Параметр/№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Температура	Температура 3								
Давление									
Объём									
Средняя температура	$(\text{Температура 1} + \text{Температура 2} + \text{Температура 3})/3$								
Работа газа									

7. Сделайте вывод о положении кривой в зависимости от температуры газа

Задание 2 - Изохорный процесс

1. Как получается уравнение для изохорного процесса из уравнения политропы?
2. Сделайте описание компьютерной модели по таблице 29 (см. рисунок 10)

Таблица 29 – Описание компьютерной модели «Изохорный процесс»

	Величины							
	Задаваемые				Вычисляемые			
Пределы изменения								
Единица измерения								

3. Задать объём газа, взяв значение из таблицы 30 в соответствии со своим вариантом (номером в журнале). Для первой серии опытов взять первое значение

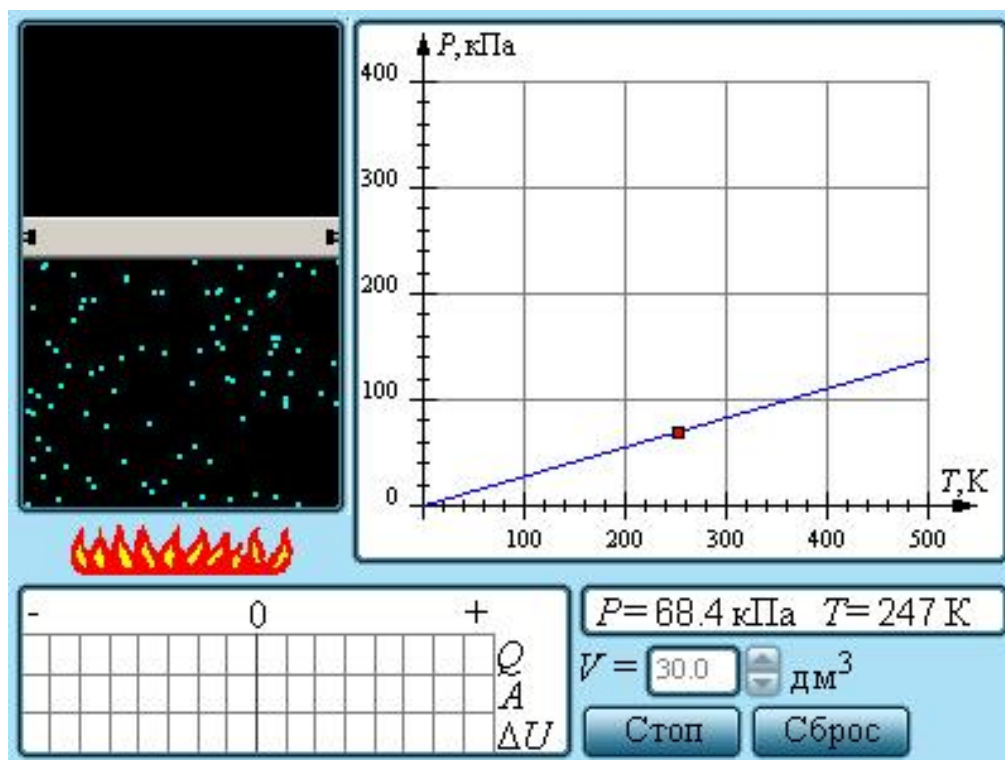


Рисунок 10 - Компьютерная модель «Изохорный процесс»

Таблица 30 – Объёмы газа для построения семейства изохор

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Объём газа	20,0	20,5	21,0	21,5	22,0	22,5	23,0	23,5	24,0	24,5
	25,0	25,5	26,0	26,5	27,0	27,5	28,0	28,5	29,0	29,5
	30,0	30,5	31,0	31,5	32,0	32,5	33,0	33,5	34,0	34,5

4. Кратковременно нажимая кнопку «Старт»/»Стоп» на модели записывать значения давления и температуры газа в таблицу 31

Таблица 31 – Исследование изохорного процесса

Параметр/№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Объём	Объём 1								
Давление									
Температура									
Параметр/№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Объём	Объём 2								
Давление									
Температура									
Параметр/№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Объём	Объём 3								
Давление									
Температура									
Средний объём	(Объём1+Объём2+Объём3)/3								

5. Построить график зависимости давления от температуры при трёх различных начальных объёмах (1, 2 и 3) в осях (p,T), а также в осях (p,V) или (V,T)
6. Рассчитайте работу газа
7. Сделайте вывод о положении графика в зависимости от начального объёма газа

Задание 3 - Изобарный процесс

1. Как получается уравнение для изобарного процесса из уравнения политропного процесса?
2. Сделать описание компьютерной модели, заполнив таблицу 32 (см. рисунок 11)

Таблица 32 – Описание компьютерной модели «Изобарный процесс»

	Величины							
	Задаваемые				Вычисляемые			
Пределы изменения								
Единица измерения								

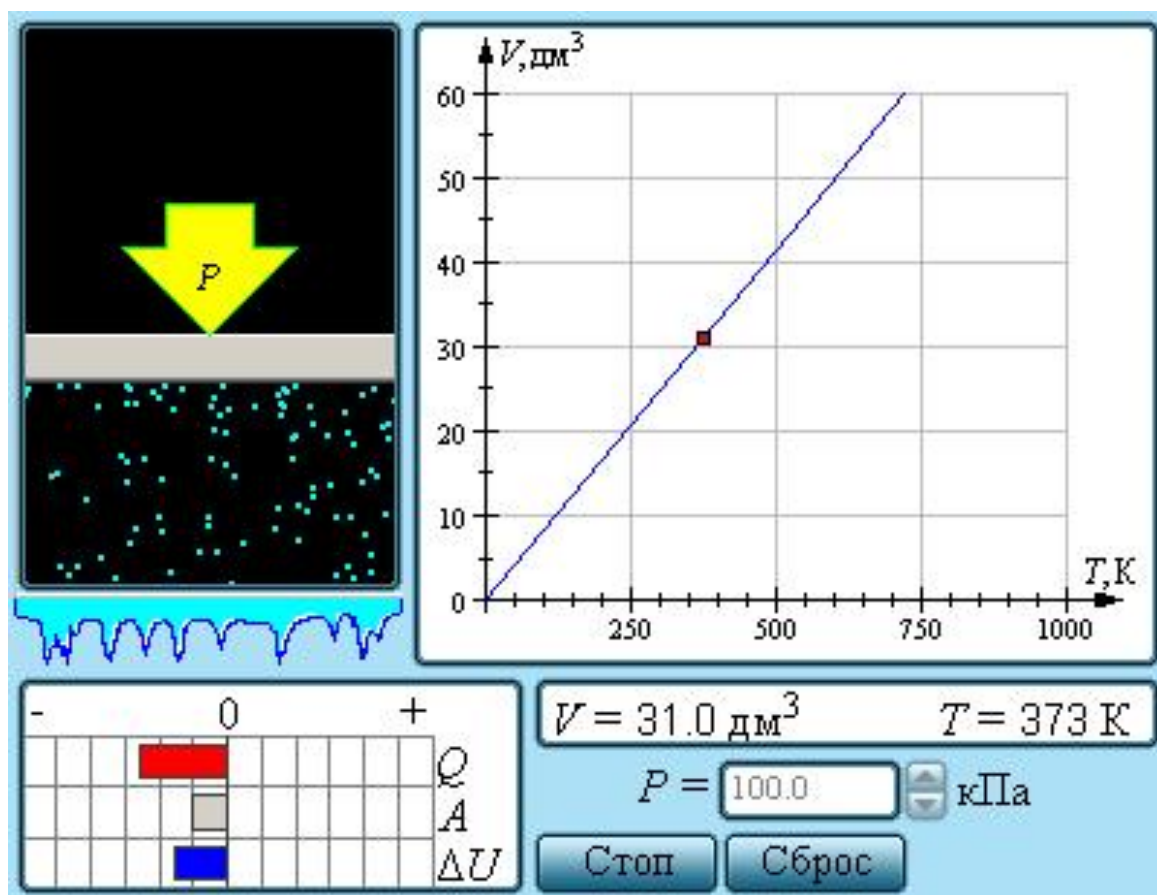


Рисунок 11 - Компьютерная модель «Изобарный процесс»

3. Задать давление газа, взяв значение из таблицы 33 в соответствии со своим вариантом (номером в журнале). Для первой серии опытов взять первое значение

Таблица 33 – Набор значений давлений газа для построения семейства изобар

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Давление газа	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95
	100	105	110	115	120	125	130	135	50	55
	60	65	70	75	80	85	90	95	100	105

4. Кратковременно нажимая кнопку «Старт»/»Стоп» на модели записывать значения объёма и температуры газа в таблицу 34

Таблица 34 – Исследование изобарного процесса

Параметр/№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Давление 1								
Объём									
Температура									
Параметр/№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Давление 2								
Объём									
Температура									
Параметр/№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Давление 3								
Объём									
Температура									
Среднее давление	$(\text{Давление1} + \text{Давление2} + \text{Давление3})/3$								
Работа газа									

5. Построить график зависимости объёма от температуры при трёх различных начальных объёмах (1, 2 и 3) в осях (V,T), а также в осях (p,V) или (p,T)

6. Рассчитайте работу газа для давления, равному среднему арифметическому ваших давлений. Для этого используйте максимальное и минимальное значение объёма (для первого расчёта) и температуры (для второго расчёта). Сравните результаты.

7. Сделайте вывод о положении графика в зависимости от начального давления газа

8. Сделайте вывод о проделанной работе в целом

Указания к работе

Все вычисления необходимо привести в бланке отчёта. Таблицы при этом составить самостоятельно.

Задание на закрепление

Составить глоссарий по теме «Первое начало термодинамики. Законы идеальных газов» в объёме 15 терминов и решить задачу из сборника задач по физике Чертова, Воробьёва (в соответствии с номером в журнале):

Таблица 35 – Номера задач для самостоятельного решения

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
№ задачи	8.27	8.31	8.29	8.21	8.24	8.30	8.22	8.28	8.34	8.20

Контрольные вопросы и задания

1. Сформулируйте первое начало термодинамики.
2. Запишите первое начало термодинамики для различных изопроцессов.
3. Получите формулы для работы при изотермическом и изобарном процессах.
4. Чему равна работа газа при изохорном процессе? Почему?
5. При каком изопроцессе работа газа максимальна?
6. Начертите графики изопроцессов в осях (p,V) , (p,T) , (V,T) .
7. Что такое теплоёмкость? Виды теплоёмкости.
8. Выведите уравнение Роберта Майера.
9. Как изменяется внутренняя энергия газа при адиабатном расширении? Где это применяется?
10. Получите уравнение Пуассона.

1.6 Реальные газы

Учебная цель работы

Эмпирические газовые законы, установленные в 17-19 веках, оказались неточными при попытке распространить их на экстремальные значения температур и давлений. Это, прежде всего, связано с принятой моделью идеальности газов: почти полным отсутствием взаимодействия между молекулами газа и пренебрежением их объёмом. Эти законы применимы для не слишком плотных газов (малых давлений) при достаточно высоких температурах. Поэтому расхождения оказываются достаточно велики. Целью работы является знакомство с моделью реального газа и изучение его теоретических изотерм на основании уравнения Ван-дер-Ваальса.

Содержание работы

При помощи компьютерной модели на примере паров воды рассмотреть изотермы реальных газов. Опираясь на данные модели построить график

зависимости давления от объёма при некоторой температуре (изотерму), построить семейство изотерм.

Подготовка к работе

Для успешного выполнения и сдачи работы необходимо подготовить бланк отчёта по работе, подготовить ответы на контрольные вопросы, знать понятия энергии, импульса, виды механической энергии, законы сохранения энергии и импульса.

Входной контроль

1. Записать уравнение Ван-дер-Ваальса. Чем оно отличается от уравнения Менделеева-Клапейрона?
2. В чём состоит физический смысл поправок Ван-дер-Ваальса?
3. Каковы единицы измерения поправок Ван-дер-Ваальса?
4. Что такое критическая температура? Кто ввёл этот термин? К каким величинам ещё применим этот термин?
5. Можно ли перевести идеальный газ в жидкое состояние? Твёрдое?
6. Можно ли перевести реальный газ в жидкое состояние? Твёрдое?
7. Что такое однофазное состояние? Двухфазное?
8. Что такое тройная точка? Каковы условия существования тройной точки для воды?
9. Что такое конденсация? Испарение?
10. Какие параметры задаются и вычисляются в модели «Изотермы реального газа»?

Порядок выполнения работы

1. Сделать описание модели согласно таблицы 36 (см. рисунок 12)

Таблица 36 – Описание компьютерной модели «Изотермы реального газа»

	Величины							
	Задаваемые				Вычисляемые			
Пределы изменения								
Единица измерения								

2. Задать температуру, при которой будет происходить процесс. Данные взять из таблицы 37 в соответствии со своим вариантом (номером в журнале)

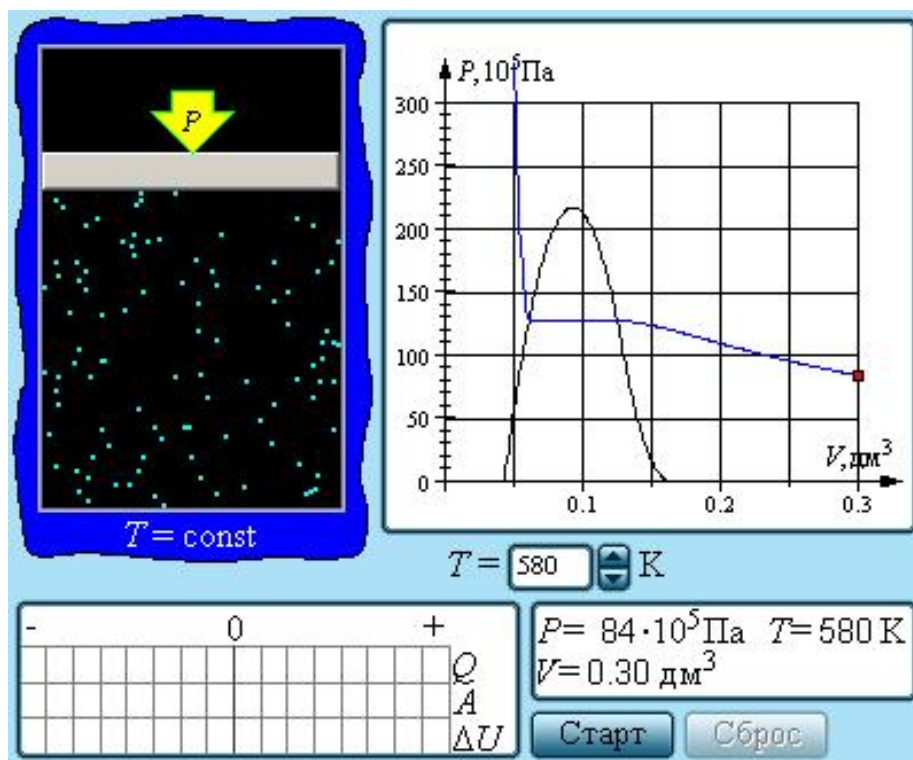


Рисунок 12 - Компьютерная модель «Изотермы реального газа»

Таблица 37 – Различные температуры газа для строительства семейства изотерм

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Температура процесса	560	565	570	575	580	585	590	595	600	605
	610	615	620	625	630	635	640	645	650	655
	660	665	670	675	680	685	690	695	700	700

3. Кратковременно нажимая кнопку «Старт»/»Стоп» на модели записывать значения давления и объёма газа в таблицу 38

Таблица 38 – Исследование изотерм реального газа

Параметр/№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Температура	Температура 1								
Давление									
Объём									
Параметр/№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Температура	Температура 2								
Давление									
Объём									
Параметр/№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Температура	Температура 3								
Давление									
Объём									

4. Построить графики зависимости давления от объёма при трёх различных начальных температурах (1, 2 и 3 – семейство изотерм) в осях (p,V)
5. Дочертить полученные изотермы пунктирной линией (другим цветом) до того вида изотермы реального газа, который приводится в литературе
6. Определить при помощи модели критические параметры
7. Рассчитать по известным формулам критические параметры для воды и сравнить их с табличными значениями. Занести в таблицу 39 (Температура в кельвинах, давление – в паскалях, молярный объём в м³/моль, плотность кг/м³)

Таблица 39 – Сравнение параметров состояния, полученных разными путями

Критические параметры реального газа на примере воды											
Полученные в модели				Рассчитанные по формулам				Табличные значения			
T	P	V	ρ	T	P	V	ρ	T	P	V	ρ

8. Сделать вывод по работе

Задание на закрепление

Составить глоссарий по теме «Реальные газы» в объёме 10 терминов и решить задачу из сборника задач по физике Чертова, Воробьёва (в соответствии с номером в журнале):

Таблица 40 – Номера задач для самостоятельного решения

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
№ задачи	12.4	12.22	12.8	12.23	12.6	13.9	12.24	12.10	12.1	12.13

Контрольные вопросы и задания

1. Почему происходят отступления от законов идеальных газов? Точно ли описывает поведение реальных газов уравнение Ван-дер-Ваальса? Почему?
2. Какие ещё уравнения были предложены для описания реальных газов?
3. Начертите изотермы уравнения Ван-дер-Ваальса
4. Показать на изотерме реального газа области жидкого состояния, газообразного, метастабильные области состояния газа.
5. Что такое перегретая жидкость? Пересыщенный пар? Реализуются ли такие состояния? При каких условиях?

6. Получите выражение для плотности газа Ван-дер-Ваальса. Чему равна температура Бойля?
7. Запишите выражения для критических параметров газа Ван-дер-Ваальса.
8. Каково приведенное уравнение Ван-дер-Ваальса? В чём его важность?
9. Опишите метод Линде ожижения реальных газов?
10. Опишите основные свойства вещества в критическом состоянии

1.7 Взаимодействие заряженных частиц с электромагнитным полем на примере заряженной частицы в поле плоского воздушного конденсатора

Учебная цель работы

Применение движения заряженных частиц в электромагнитных полях получило широкое распространение в науке и технике. К приборам подобного рода относятся электронно-лучевые трубки, ускорители элементарных частиц и многие другие.

Содержание работы

Изучить движение заряженной частицы (электрона) в электрическом поле плоского конденсатора, изменяя такие параметры как проекции скорости по осям X и Y , а также напряжённость электрического поля. Построить график зависимости смещения электрона от напряжённости поля; модуля конечной скорости от модуля начальной; времени полёта электрона от модуля вектора скорости; начертить кривую движения электрона в электрическом поле.

Подготовка к работе

Для успешного выполнения и сдачи работы необходимо подготовить бланк отчёта по работе, подготовить ответы на контрольные вопросы, знать понятия электрического поля, напряжённости электрического поля, что такое однородное, стационарное электрическое поле, основной закон электростатики.

Входной контроль

1. Что изучает электростатика? Электродинамика?
2. Какая сила действует на заряженную частицу в электрическом поле?
3. Сформулируйте закон Кулона. Для каких зарядов он применим?
4. Какое поле называется стационарным (постоянным)? Однородным?
5. Как определяется напряжённость электрического поля, создаваемого неподвижным точечным зарядом? Бесконечной заряженной плоскостью? Параллельными плоскостями?
6. Какая сила действует на заряд в электрическом поле?
7. Можно ли считать электрическое поле плоского конденсатора однородным? В каких случаях?
8. Сформулируйте принцип суперпозиции электростатических полей.

9. Чему равны коэффициенты пропорциональности в законе Кулона в СГС и СИ?
10. Что такое линейная, поверхностная и объёмная плотность заряда?

Порядок выполнения работы

1. Сделать описание модели, согласно таблице 41 (см. рисунок 13)

Таблица 41 – Описание компьютерной модели «Движение заряда в электрическом поле»

	Величины							
	Задаваемые				Вычисляемые			
Пределы изменения								
Единица измерения								

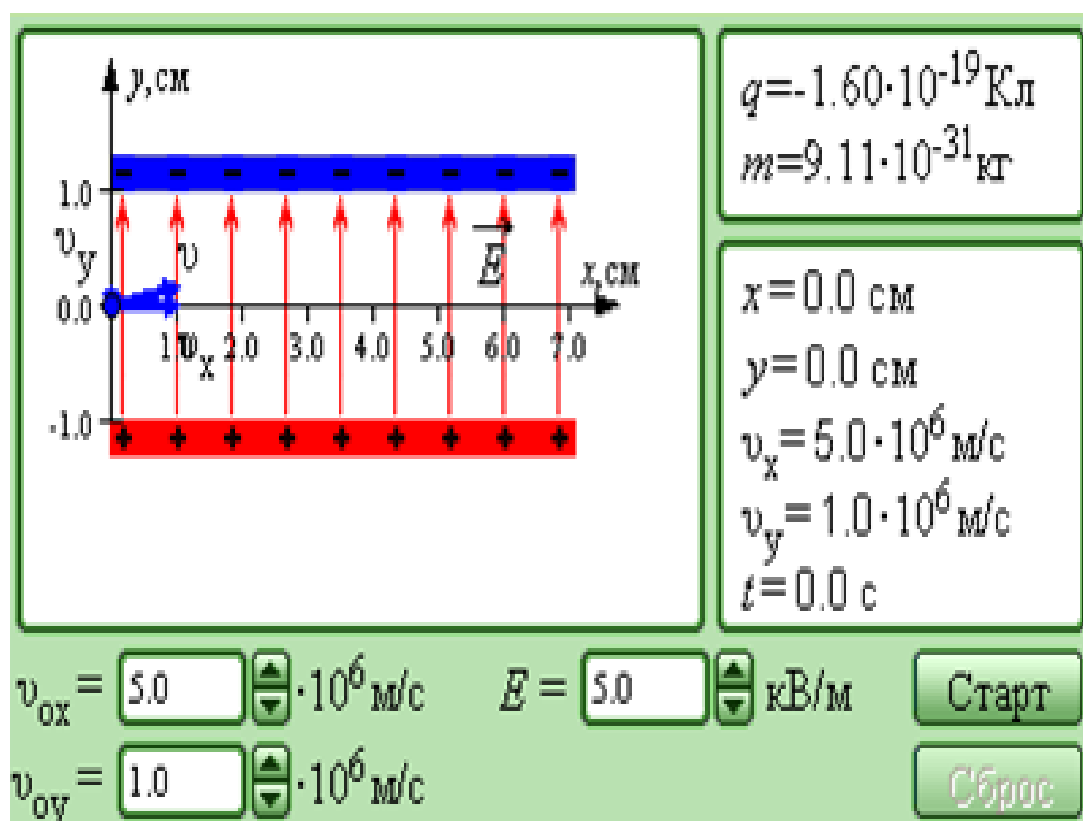


Рисунок 13 – Компьютерная модель «Движение заряда в электрическом поле»

Задание 1

1. Получите уравнение для траектории движения заряженной частицы в однородном постоянном электрическом поле

2. Установить значение проекции вектора скорости на ось Y равной 2.0
3. Установить напряжённость электрического поля равной 1,5
4. Задать значение проекции вектора скорости на ось X в соответствии с таблицей 42 в соответствии со своим вариантом (номером в журнале)

Таблица 42 – Начальное значение проекции вектора скорости на ось x

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V_{0x}	4.0	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	4.7	4.8	5.0

5. Нажимая кнопку «Старт»/«Стоп», записывать значения координат x и y , времени полёта. Данные занести в таблицу 43

Таблица 43 – Исследование кинематических характеристик заряда в электрическом поле конденсатора

№	V_{0x}	V_{0y}	V_0	x	y	t	V_x	V_y	V
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									

6. По полученным значениям координат построить кривую движения заряда в электрическом поле
7. Рассчитать модуль начальной скорости во время полёта (по проекциям на оси)
8. Рассчитать модуль скорости во время движения (по проекциям на оси)
9. По рассчитанным значениям модуля скорости построить график зависимости модуля конечной скорости от модуля начальной $V=V(V_0)$
10. Построить график зависимости времени полёта модуля вектора скорости $t=t(V)$
11. Сделать вывод траектории движения заряженной частицы
12. Сделать вывод о зависимости модуля конечной скорости от модуля начальной

13. Сделать вывод о зависимости времени полёта частицы от модуля начальной скорости

Задание 2

1. Задать начальное значение проекции скорости на ось Y равной нулю
2. Значение начальной проекции вектора скорости на ось X взять из таблицы 44

Таблица 44 – Значения проекции вектора начальной скорости на ось x

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V_{0x}	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9
	3.0	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	3.8	3.9
	4.2	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	4.7	4.8	4.9	5.0

3. Изменяя значение напряжённости вектора электрического поля, записывать в таблицу 45 значения времени полёта и конечных значений проекций вектора скорости

Таблица 45 – Исследование влияния напряжённости поля на движение заряда

№	V_{0x}	E	t	V_x	V_y	V
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						

4. По полученным данным построить график зависимости времени полёта от напряжённости электрического поля для трёх скоростей (в одной координатной плоскости)
5. Построить график зависимости модуля конечной скорости от напряжённости электрического поля
6. Сделать вывод о зависимости времени полёта частицы от напряжённости поля
7. Сделать вывод о зависимости конечной скорости от напряжённости поля

Задание 3

1. Установить значение проекции вектора скорости на ось Y равной 1.5
2. Задать значение проекции вектора скорости на ось X в соответствие с таблицей 2
3. Изменяя напряжённость поля от 2 до 10 кВ/м записывать в таблицу 46 значения координат частицы

Таблица 46 – Исследование зависимости смещения частицы

№	V_{0x}	V_{0y}	E	x	y	r	E_{cp}
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							
16							
17							
18							
19							
20							

4. Построить график зависимости смещения (определяемое как $r = \sqrt{x^2 + y^2}$) от напряжённости электрического поля
 5. Для среднего арифметического напряжённостей поле рассчитать ускорение частицы
 6. Сделать вывод о зависимости смещения частицы от напряжённости поля
- Сделать вывод по работе

Указания к работе

Основные вычисления необходимо привести в бланке отчёта

Задание на закрепление

Составить глоссарий по теме «Электростатика» в объёме 15 терминов и решить задачу из сборника задач по физике Чертова, Воробьёва (в соответствии с номером в журнале):

Таблица 47 – Номера задач для самостоятельного решения

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
№ задачи	13.5	14.2	14.5	13.2	14.4	13.6	14.3	13.4	14.6	13.9

Контрольные вопросы и задания

1. Что такое электрическое поле? Какой величиной оно характеризуется?
2. Что означает потенциальность электрического поля?
3. Записать уравнение движения заряд в постоянном и переменном электрическом поле
4. Получить уравнение для траектории заряженной частицы, движущейся в однородном постоянном электрическом поле
5. Как определяется ускорение заряженной частицы в постоянном электрическом поле?
6. Записать закон сохранения энергии при движении заряда в постоянном электрическом поле
7. Какую скорость приобретает заряженная частица при прохождении разности потенциалов U ?
8. Каков характер движения заряженной частицы в продольном электрическом поле? Поперечном?
9. Что такое удельный заряд? Для чего применяют масс-спектрографы?
10. Опишите опыт Милликена по определению элементарного заряда

1.8 Взаимодействие заряженных частиц с электромагнитным полем на примере движения заряженной частицы в однородном магнитном поле

Учебная цель работы

Применение движения заряженных частиц в электрических и магнитных полях получило широкое распространение в науке и технике. К приборам подобного рода относятся электронно-лучевые трубки, ускорители элементарных частиц, масс-спектрометры и многие другие.

Содержание работы

В данной лабораторной работе необходимо изучить движение заряженной частицы в магнитном поле. Задавая такие параметры, как проекции вектора скорости и индукцию магнитного поля, можно видеть как изменяется траектория движения заряженной частицы, каков радиус её вращения, можно вычислить период обращения. Необходимо построить графики следующих

зависимостей: гироскопического радиуса и периода обращения частицы от проекции скорости на ось x ; циклотронной частоты и периода обращения от значения индукции магнитного поля; длины шага от значения проекции вектора скорости на ось x . Все зависимости строятся при условии, что третий параметр, задаваемый в модели остаётся постоянным или равен нулю.

Подготовка к работе

Для успешного выполнения и сдачи работы необходимо подготовить бланк отчёта по работе, подготовить ответы на контрольные вопросы, знать понятия тока, магнитного поля, законы Био-Савара и Ампера, выражение для силы Лоренца.

Входной контроль

1. Какой величиной характеризуется магнитное поле? В чём она измеряется?
2. Какая сила действует на движущийся заряд в магнитном поле? Как она называется?
3. Чему равна сила, действующая со стороны магнитного поля, на покоящуюся заряженную частицу?
4. Записать закон Био-Савара.
5. Как направлена сила, действующая на движущуюся заряженную частицу? Сформулируйте правило буравчика.
6. Какую работу совершает сила Лоренца при движении заряда?
7. Какая сила действует на проводник с током в магнитном поле?
8. Изобразите силовые линии прямолинейного проводника с током.
9. Как взаимодействуют два параллельных бесконечно длинных проводника с током?
10. Какие величины задаются в модели? Вычисляются?

Порядок выполнения работы

Задание 1

1. Сделать описание модели в соответствие с таблицей 48 (см. рисунок 14)

Таблица 48 – Описание компьютерной модели «Движение заряженной частицы в магнитном поле»

	Величины							
	Задаваемые				Вычисляемые			
Пределы изменения								
Единица измерения								

2. Получить формулу для гироскопического радиуса
3. Задать значение проекции вектора скорости на ось z равной нулю
4. Установить значение вектора магнитной индукции равной в соответствии с таблицей 49

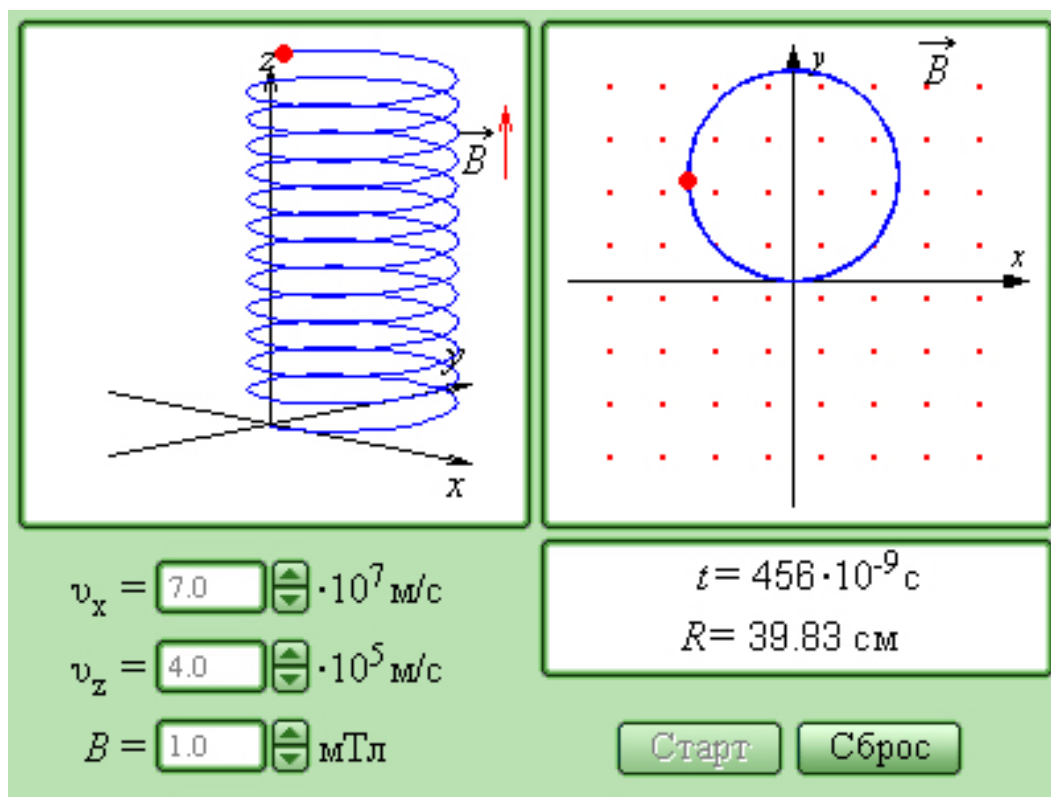


Рисунок 14 - Компьютерная модель «Движение заряженной частицы в магнитном поле»

Таблица 49 – Значение индукции магнитного поля

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Индукция магнитного поля	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,5	1,7	1,8	2,0

5. Изменяя значение проекции вектора скорости на ось x, записывать значения гироскопического радиуса, число полных оборотов и времени (соответствующее полному количеству оборотов) в таблицу 50
6. Вычислить период обращения частицы: $T=t/N$
7. Построить график зависимости гироскопического радиуса и периода обращения от начальной скорости (проекции на ось x)
8. Получить формулу для циклотронной частоты
9. Построить график зависимости циклотронной частоты и периода обращения от скорости при определённом значении индукции поля
10. В какую сторону движется заряд при положительном и отрицательном значении индукции поля

11. Сделать вывод о зависимости гироскопического радиуса, циклотронной частоты и периода обращения от величины проекции скорости на ось x

Таблица 50 – Исследование влияния начальной скорости на движение частицы

№	V_z	V_x	Индукция B	Число оборотов N	Время t	Период T	Гир. радиус R
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							

Задание 2

1. Задать значение проекции вектора скорости на ось z равной нулю
2. Установить значение проекции вектора скорости на ось x в соответствии с таблицей 51

Таблица 51 – Значение компонента вектора скорости по оси x

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Скорость по оси x	1,0	1,7	2,3	3,0	3,7	4,3	5,0	5,7	6,3	8

3. Изменяя индукция магнитного поля B , записывать значения гироскопического радиуса, число полных оборотов и времени (соответствующее полному количеству оборотов) в таблицу 52
4. Вычислить период обращения частицы: $T=t/N$
5. Построить график зависимости гироскопического радиуса и периода обращения от величины вектора магнитной индукции
6. Построить график зависимости циклотронной частоты и периода обращения от вектора магнитной индукции при определённом значении скорости
7. Сделать вывод о зависимости гироскопического радиуса, циклотронной частоты и периода обращения от величины магнитного поля
8. Сделать вывод о траектории движения частицы в отсутствие составляющей вектора скорости по оси z

Таблица 52 – Исследование влияния изменения индукции поля на движение частицы

№	Vz	Индукция, В	Vx	Число оборотов, N	Время, t	Период, T	Гир. Радиус, R
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							

Задание 3

1. Задать скорость по оси x в соответствии с таблицей 51
2. Значение составляющей скорости по оси z взять из таблицы 53

Таблица 53 – Значение компоненты вектора скорости по оси z

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Скорость по оси z	1,0	1,7	2,3	3,0	3,7	4,3	5,0	5,7	6,3	8

3. Изменяя значения вектора индукции магнитного поля В, записывать в таблицу число полных оборотов, время движения и гироскопический радиус
4. Вычислить значения периода движения и занести в таблицу
5. Вычислить длину шага при движении частицы
6. Построить график зависимости шага движения от значения вектора напряжённости. Полученные результаты занести в таблицу
7. Зная длину гироскопического шага и количество полных оборотов рассчитать путь (приблизительно) и перемещение частицы при движении. Результаты записать в таблицу
8. Таблицу составить самостоятельно
9. Сделать вывод о зависимости шага от величины магнитного поля

Задание 4

1. Установить максимальное значение вектора индукции магнитного поля
2. Значение составляющей скорости по оси z взять из таблицы 53

3. Изменяя значения проекции вектора скорости по оси x записывать в таблицу число полных оборотов, время движения и гироскопический радиус
4. Вычислить значения периода движения и занести в таблицу
5. Вычислить длину шага при движении частицы
6. Построить график зависимости шага движения от значения проекции вектора скорости на ось x . Полученные результаты занести в таблицу
7. Зная длину гироскопического шага и количество полных оборотов рассчитать путь и перемещение частицы при движении. Результаты записать в таблицу
8. Таблицу составить самостоятельно
9. Сделать вывод о зависимости шага от величины скорости по оси x
10. Сделать вывод по работе в целом.

Указания к работе

Все вычисления необходимо привести в бланке отчёта. Для подсчёта периода, необходимо считать полные обороты при движении частицы. Это значит, что нужно засекать время, за которое частица приходит из начального положения снова в него же. Для удобства обороты можно отсчитывать от начала координат.

Если значения параметров таковы, что частица вылетает за пределы видимой части окна модели, необходимо подождать, пока частица вновь покажется в окне.

Задание на закрепление

Составить глоссарий по теме «Магнитное поле» в объёме 15 терминов и решить задачу из сборника задач по физике Чертова, Воробьёва (в соответствии с номером в журнале):

Таблица 54 – Номера задач для самостоятельного решения

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
№ задачи	21.14	21.33	21.4	21.15	21.35	21.17	21.15	21.34	21.5	21.16

Контрольные вопросы и задания

1. Что такое магнитное поле? Что такое ток?
2. Какова траектория движения заряженной частицы в магнитном поле?
3. Вывести формулу для циклотронной частоты?
4. Чему равен гироскопический радиус?
5. Чему равны магнитные поля: кругового тока, прямолинейного бесконечно длинного проводника с током, соленоида, тороидальной катушки.
6. Что означает соленоидальность магнитного поля?
7. Каково математическое выражение того факта, что магнитное поле является соленоидальным (вихревым)?

8. В чём заключается теорема о циркуляции вектора индукции магнитного поля.
9. Чему равна энергия магнитного поля?
10. Чему равна магнитная постоянная?

1.9 Применение движения заряженных частиц в магнитном поле в работе масс-спектрографа

Учебная цель работы

Масс-спектрометрия - метод определения химического, фазового состава и молекулярной структуры вещества, основанный на регистрации спектра масс ионов, образованных в результате ионизации атомов и (или) молекул пробы. По спектру масс (совокупность значений m/e и относительных содержаний соответствующих ионов) определяют относительное содержание элементов, изотопов определенного элемента, концентрацию и структуру химических соединений в пробе. Масс-спектрометр - прибор для разделения ионизованных частиц (атомов, молекул, кластерных образований) по их массам (точнее по отношению массы иона m к его заряду e) путем воздействия магнитных и электрических полей, а также для определения их масс и относительных содержаний, т.е. спектра масс. Метод имеет чрезвычайно широкий спектр применений и приложений: биохимия, клиническая химия, общая химия и органическая химия, фармацевтика, косметика, парфюмерия, пищевая промышленность, химический синтез, нефтехимия и нефтепереработка, контроль окружающей среды, производство полимеров и пластиков, медицина и токсикология, криминалистика, допинговый контроль, контроль наркотических средств, контроль алкогольных напитков, геохимия, геология, гидрология, петрография, минералогия, геохронология, археология, ядерная промышленность и энергетика, полупроводниковая промышленность, металлургия

Содержание работы

Изучить масс-спектрометрический метод определения веществ, используя компьютерную модель.

Подготовка к работе

Для успешного выполнения и сдачи работы необходимо подготовить бланк отчёта по работе, подготовить ответы на контрольные вопросы, знать понятия удельного заряда, особенности движения заряженных частиц в магнитном поле.

Входной контроль

1. Что такое удельный заряд? В чём он измеряется?
2. Какая сила действует на заряженную частицу в магнитном поле?
3. По какой траектории движется заряженная частица в магнитном поле?
4. Что такое гироскопический радиус?

5. Как зависит гироскопический радиус движения частицы в магнитном поле от скорости и индукции магнитного поля?
6. Какие величины задаются в модели?
7. Какие изотопы позволяет разделять модель «Масс-спектрометр»

Порядок выполнения работы

1. Сделать описание компьютерной модели согласно таблице 55 (см. рисунок 15)

Таблица 55 – Описание компьютерной модели «Масс-спектрограф»

	Величины							
	Задаваемые				Вычисляемые			
Пределы изменения								
Единица измерения								

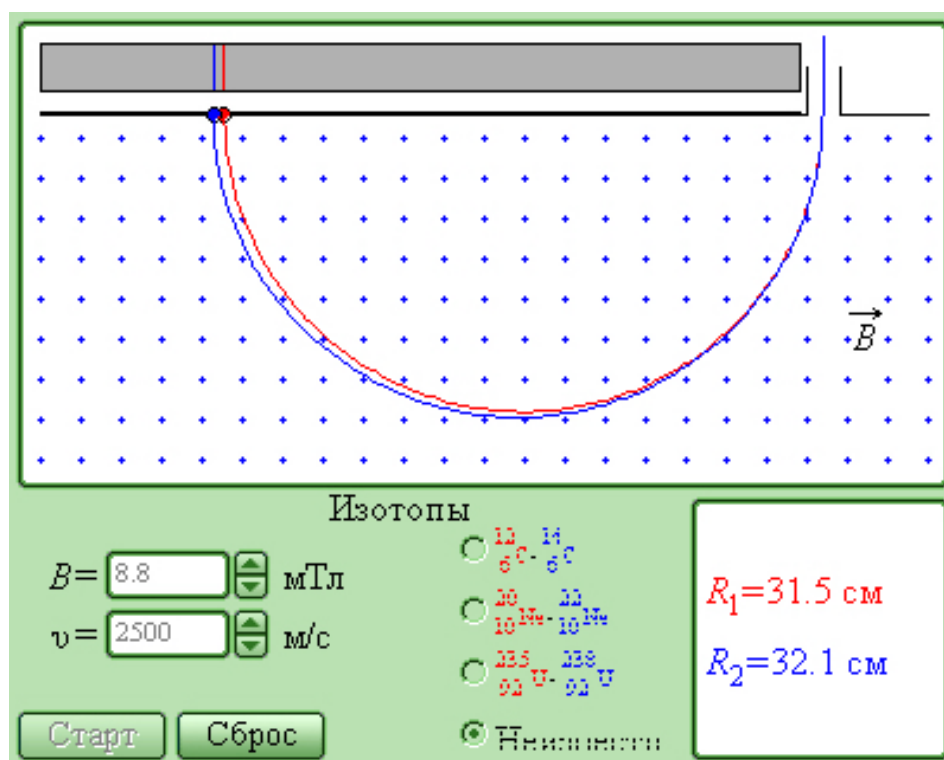


Рисунок 15 – Компьютерная модель «Масс-спектрограф»

2. Получить выражение для гироскопического радиуса
3. Задать в модели первую смесь изотопов (углерод)

Таблица 56 – Скорости разделяемых изотопов

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Скорость	2100	2200	2300	2400	2500	2600	2700	2800	2900	3000

4. Установить значение скорости изотопов в соответствии с таблицей 56
5. Для 10 значений магнитной индукции записать в таблицу значения радиусов разделённых изотопов

Таблица 57 - Исследование зависимости радиусов кривизны от величины индукции магнитного поля

№	Индукция	Скорость	Изотоп	Радиус1	Раддиус2
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

6. Установить величину магнитного поля в соответствии с таблицей 58

Таблица 58 – Магнитное поле в масс-спектрографе

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Индукция										

7. Для 10 значений скорости записать в таблицу 57 значения радиусов разделённых изотопов

Таблица 59 – Исследование зависимости радиусов кривизны от величины начальной скорости

№	Индукция	Скорость	Изотоп	Радиус1	Раддиус2
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

8. Установить следующую смесь изотопов и проделать пункты 5,7, подбирая значения начальной скорости и индукции поля
9. Установить неизвестный изотоп и для 5 значений индукции при некоторой постоянной скорости записать значения радиусов в таблицу 59
10. Определить смесь неизвестных изотопов
11. Сделать вывод по работе

Задание на закрепление

Составить глоссарий по теме в объёме 15 терминов по теме «Частицы в магнитном поле».

Контрольные вопросы и задания

1. В чём заключается метод масс-спектро스코пии?
2. Что такое масс-спектрограф?
3. Опишите принципиальную схему устройства масс-спектрографа.
4. Как классифицируют масс-спектрографы?
5. Опишите методы получения ионов для масс-спектроскопии
6. Где применяют масс-спектроскопию?
7. Какая информация может быть получена при масс-спектрографических исследованиях?
8. С какими ещё методами сочетается масс-спектрометрия?

1.10 Электромагнитные колебания на примере свободных и затухающих колебаний в последовательном RLC-контуре

Учебная цель работы

С математической точки зрения электромагнитные колебания в колебательном контуре описываются теми же дифференциальными уравнениями, что и механические колебания, будь то груз на пружине или математический маятник. Однако физический механизм этих колебаний имеют совершенно другой смысл. В работе также проводится аналогия между электромагнитными и механическими колебаниями.

Содержание работы

В лабораторной работе при помощи компьютерной модели необходимо изучить свободные и затухающие электромагнитные колебания в колебательном контуре. Построить графики зависимости заряда и силы тока от времени при различных значениях ёмкости конденсатора, индуктивности катушки и активного сопротивления. Изучить собственные и затухающие колебания в колебательном контуре.

Подготовка к работе

Для успешного выполнения и сдачи работы необходимо подготовить бланк отчёта по работе, подготовить ответы на контрольные вопросы, знать

устройство конденсатора и катушки индуктивности, понятия колебательного контура, электрического заряда, электрического и магнитного поля, периодичности.

Входной контроль

1. Какие электромагнитные колебания называются свободными? Затухающими?
2. Что такое колебательный контур?
3. Какой колебательный контур называется идеальным? Реальным?
4. Начертить последовательный и параллельный идеальный и реальные колебательный контур.
5. Существуют ли идеальный колебательный контур? Почему?
6. Поясните, как протекают электромагнитные колебания в колебательном контуре.
7. Какие величины испытывают колебания в колебательном контуре? По какому закону это происходит?
8. Что означает квазистационарность процессов в колебательном контуре?
9. Какие виды энергии претерпевают превращение в колебательном контуре?
10. Какие параметры задаются и вычисляются в модели?

Порядок выполнения работы

Задание 1 - Изучение собственных (незатухающих) колебаний

1. Сделать описание модели согласно таблице 60 (см. рисунок 16)

Таблица 60 – Описание компьютерной модели «Электромагнитные колебания в контуре»

	Величины							
	Задаваемые			Вычисляемые				
Пределы изменения								
Единица измерения								

2. Сделать чертёж идеального и реального колебательного контура
3. Получить дифференциальное уравнение собственных колебаний
4. Установить значение активного сопротивления, равным нулю
5. Задать начальное значение заряда на конденсаторе в соответствии с таблицей 61

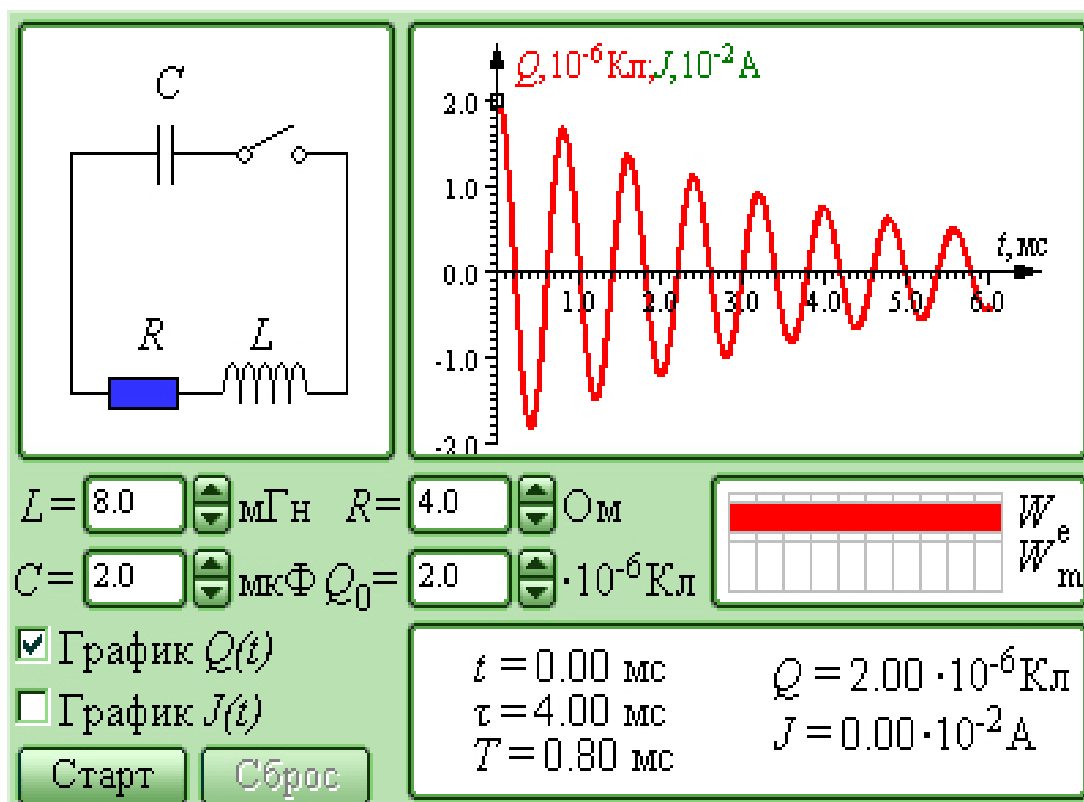


Рисунок 16 – Компьютерная модель «Электромагнитные колебания в контуре»

Таблица 61 – Значение начального заряда конденсатора

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Начальный заряд конденсатора	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2

6. Задать значение электроёмкости конденсатора равным 3 мкФ
7. Установить значение индуктивности катушки равными 4 мГн, 6 мГн и 8 мГн
8. Нажать кнопку «Пуск» и записывать в таблицу значения заряда и тока
9. Построить в одной координатной плоскости графики зависимости заряда и тока от времени для трёх значений индуктивности
10. Записать в таблицу значение периода колебаний
11. Зная значения электроёмкости и индуктивности рассчитать по формуле Томсона значение периода колебаний (для трёх случаев) и сравнить с полученными в модели
12. Сделать вывод
13. Задать начальное значение заряда на конденсаторе в соответствие с таблицей 61
14. Установить значение индуктивности катушки равными 6 мГн
15. Задать значение электроёмкости конденсатора равным 2 мкФ, 3 мкФ и 4 мкФ

16. Нажать кнопку «Пуск» и записывать в таблицу значения заряда и тока
17. Построить в одной координатной плоскости графики зависимости заряда и тока от времени для трёх значений ёмкости
18. Записать в таблицу значение периода колебаний
19. Зная значения электроёмкости и индуктивности рассчитать по формуле Томсона значение периода колебаний (для трёх случаев) и сравнить с полученными в модели
20. Сделать вывод
21. Установить произвольные значения электроёмкости и индуктивности
22. Для трёх значений начального заряда построить на одной координатной плоскости графики зависимости заряд и тока от времени

Задание 2 - Изучение затухающих колебаний

1. Установить начальное значение начального заряда в соответствии с таблицей 2
2. Задать значения ёмкости 3 мкФ, а индуктивности 5 мГн
3. Данные об активном сопротивлении взять из таблицы 62

Таблица 62 – Набор сопротивлений резистора в цепи

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Активное сопротивление	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5
	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	11,5
	11	11,5	12	12,5	13	13,5	14	14,5	15	15,5
	16	16,5	17	17,5	18	18,5	19	19	20	20

4. На одной координатной плоскости построить графики зависимости заряд и тока от времени при различных значениях активного сопротивления
5. Задать значения ёмкости 5 мкФ, а индуктивности 8 мГн
6. Изменяя значения активного сопротивления записывать значения периода затухания
7. Построить график зависимости периода затухания от активного сопротивления
8. Сделать выводы по работе

Указания к работе

Все вычисления необходимо привести в бланке отчёта. Соблюдать номер своего варианта при выполнении измерений и домашнего задания.

Задание на закрепление

Составить глоссарий по теме «Электромагнитные колебания и волны» в объёме 15 терминов.

Контрольные вопросы и задания

1. Проведите аналогию между электромагнитными колебаниями в колебательном контуре и механическими колебаниями.
2. Получите дифференциальное уравнение свободных электромагнитных колебаний.
3. Запишите формулы для частоты и периода электромагнитных колебаний в контуре.
4. Каково решение дифференциального уравнения свободных электромагнитных колебаний?
5. Выведите дифференциальное уравнение затухающих колебаний в контуре.
6. Запишите решение дифференциального уравнения затухающих колебаний.
7. Что такое декремент затухания? Логарифмический декремент затухания?
8. Начертите свободные и затухание колебания в контуре.
9. По какому закону изменяется заряд и ток в случае свободных колебаний? Каков сдвиг фаз между этими колебаниями?
10. По какому закону изменяется заряд и ток в случае затухающих колебаний? Что такое критическое сопротивление?

1.11 Проверка законов отражения на примере плоского и сферического зеркал

Учебная цель работы

Плоским зеркалом широко пользуются и в быту, и при устройстве различных приборов. Известно, что точность отсчёта по какой-либо шкале зависит от правильного расположения глаза. Чтобы уменьшить ошибку отсчёта, точные измерительные приборы снабжаются зеркальной шкалой. Работающий с таким прибором видит деления шкалы, узкую стрелку и её изображение в зеркале. Правильным будет такой отсчёт по шкале, при котором глаз расположен так, что стрелка закрывает своё изображение в зеркале. Отражённый от зеркала «зайчик» заметно смещается при повороте зеркала даже на небольшой угол. Это явление используется в измерительных приборах, отсчёт показаний которых производится на удалённой от прибора шкале по смещению светового «зайчика» на этой шкале. «Зайчик» получается от маленького зеркальца, связанного с подвижной частью прибора и освещаемого от специального источника света. Измерительные приборы с таким устройством для отсчёта показаний обычно очень чувствительны. Плоские зеркала очень широко используются в быту, а также в приборах, в которых нужно изменить направление хода лучей, например в перископе.

Вогнутые зеркала используют для изготовления прожекторов: источник света помещают в фокусе зеркала, отраженные лучи идут от зеркала параллельным пучком. Если взять вогнутое зеркало больших размеров, то в фокусе можно получить очень высокую температуру. Тут можно разместить резервуар с водой для получения горячей воды, например, для бытовых нужд за счёт энергии Солнца. С помощью вогнутых зеркал можно направить большую часть света, излучаемого источником, в нужном направлении. Для этого вблизи источника света помещается вогнутое зеркало, или, как его называют, рефлектор. Так устраиваются автомобильные фары, проекционные и карманные фонари, прожекторы. Мощные прожекторы используются при устройстве маяков. Кроме того, вогнутые зеркала применяются в телескопах-рефлекторах, с помощью которых наблюдают небесные тела.

Содержание работы

В данной работе необходимо изучить плоское, вогнутое и выпуклое сферические зеркала, поведение изображения в зависимости от расстояния до предмета; в случае сферических зеркал также и от фокусного расстояния зеркала; изучить увеличение, даваемое зеркалами.

Подготовка к работе

Для успешного выполнения работы необходимо подготовить бланк отчёта по работе, подготовить ответы на входные вопросы, знать законы геометрической оптики, понятия зеркала, фокуса, фокусного расстояния, полюса, действительного и мнимого изображения.

Входной контроль

1. Что такое плоское зеркало? Сферическое?
2. Какое сферическое зеркало называется выпуклым? Какое вогнутым?
3. Какой пучок называется параксиальным? Какой ход лучей называется стигматическим?
4. Какое изображение называется мнимым? Действительным?
5. Что такое оптический центр зеркала? Полюс?
6. Что такое главная оптическая ось зеркала? Побочная?
7. Сколько главных и побочных оптических осей может иметь сферическое зеркало?
8. Главный фокус? Фокусное расстояние?
9. Как связано фокусное расстояние зеркала с его радиусом?
10. Чему равно линейное увеличение плоского зеркала? Сферического?

Порядок выполнения работы

Задание 1. Плоское зеркало

1. Сделать описание модели (см. рисунок 17) согласно таблице 1

Таблица 63 - Описание компьютерной модели «Плоское зеркало»

	Величины							
	Задаваемые				Вычисляемые			
Пределы изменения								
Единица измерения								

2. Какова цена деления шкалы в модели?
3. Определите максимальные и минимальные значения координат x, y для конца и начала предмета и изображения
4. Определите размеры предмета и изображения
5. Как соотносятся длины предмета и изображения?
6. Найдите максимальное и минимальное расстояние между концами (началами) предмета и изображения
7. Построить изображение отрезка, взяв координаты начала и конца отрезка из таблицы 2
8. Указать направление полученного отрезка, вычислить его длину и угол наклона к плоскости зеркала

Таблица 64 - Варианты выбора начала и конца отрезка для построения изображения в плоском зеркале

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
x_1	25	54	92	114	156	190	212	245	274	290
x_2	174	215	21	192	290	12	143	23	93	34
y_1	50	55	60	65	100	70	75	80	90	95
y_2	90	85	75	95	50	95	100	65	60	55

9. Сравнить вычисленную длину с длиной, измеренной линейкой
10. Вычислить относительную погрешность измерения по формуле (1)

$$\varepsilon = \frac{|x_{\text{вычисленное}} - x_{\text{измеренное}}|}{x_{\text{вычисленное}}} \cdot 100\% \quad (1)$$

11. Все результаты занести в таблицу

12. Сделать вывод по заданию 1

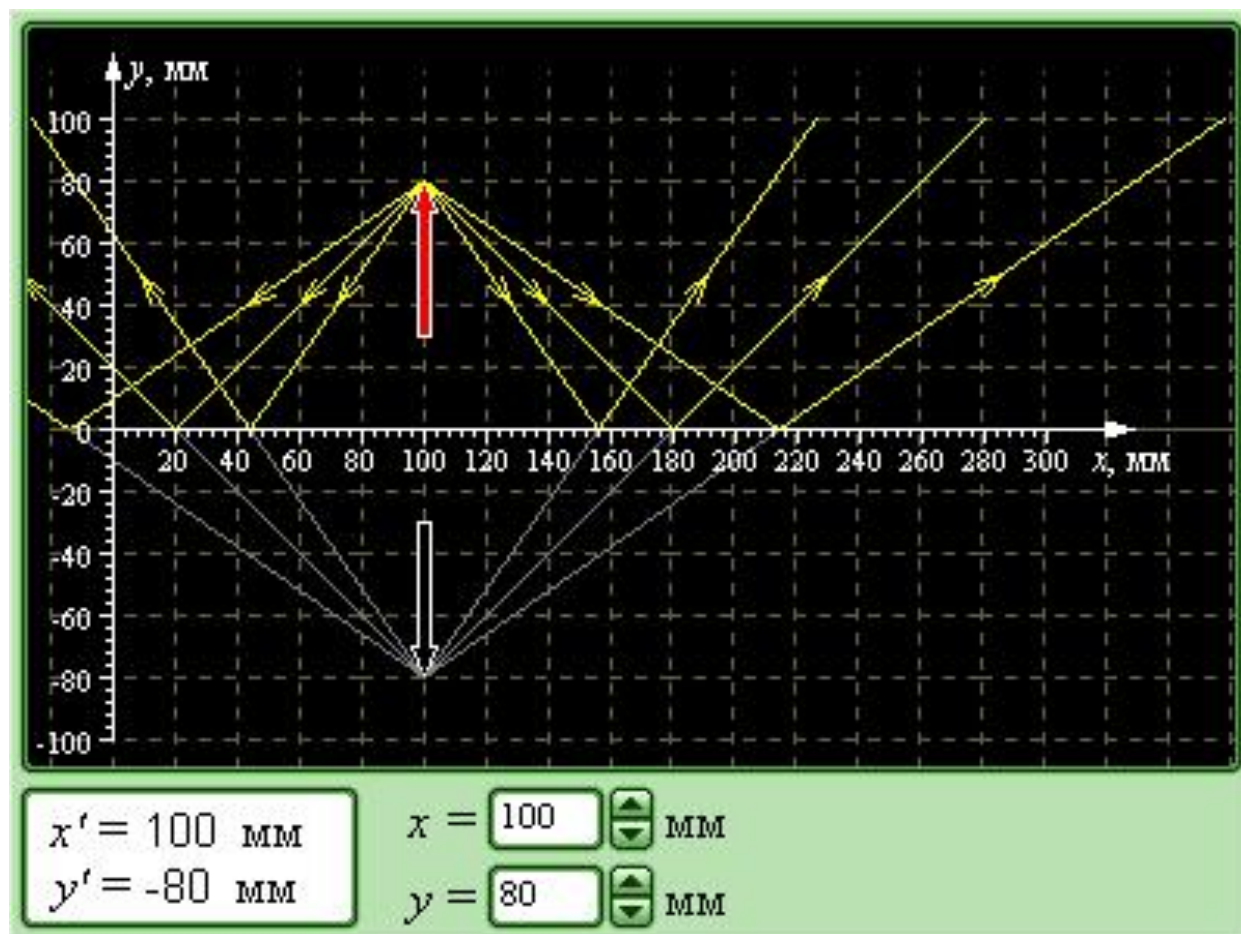


Рисунок 17– Компьютерная модель «Плоское зеркало»

Задание 2. Сферическое зеркало

1. Сделать описание модели (см. рисунок 18) согласно таблице 65

Таблица 65 - Описание компьютерной модели «Сферическое зеркало»

	Величины							
	Задаваемые				Вычисляемые			
Пределы изменения								
Единица измерения								

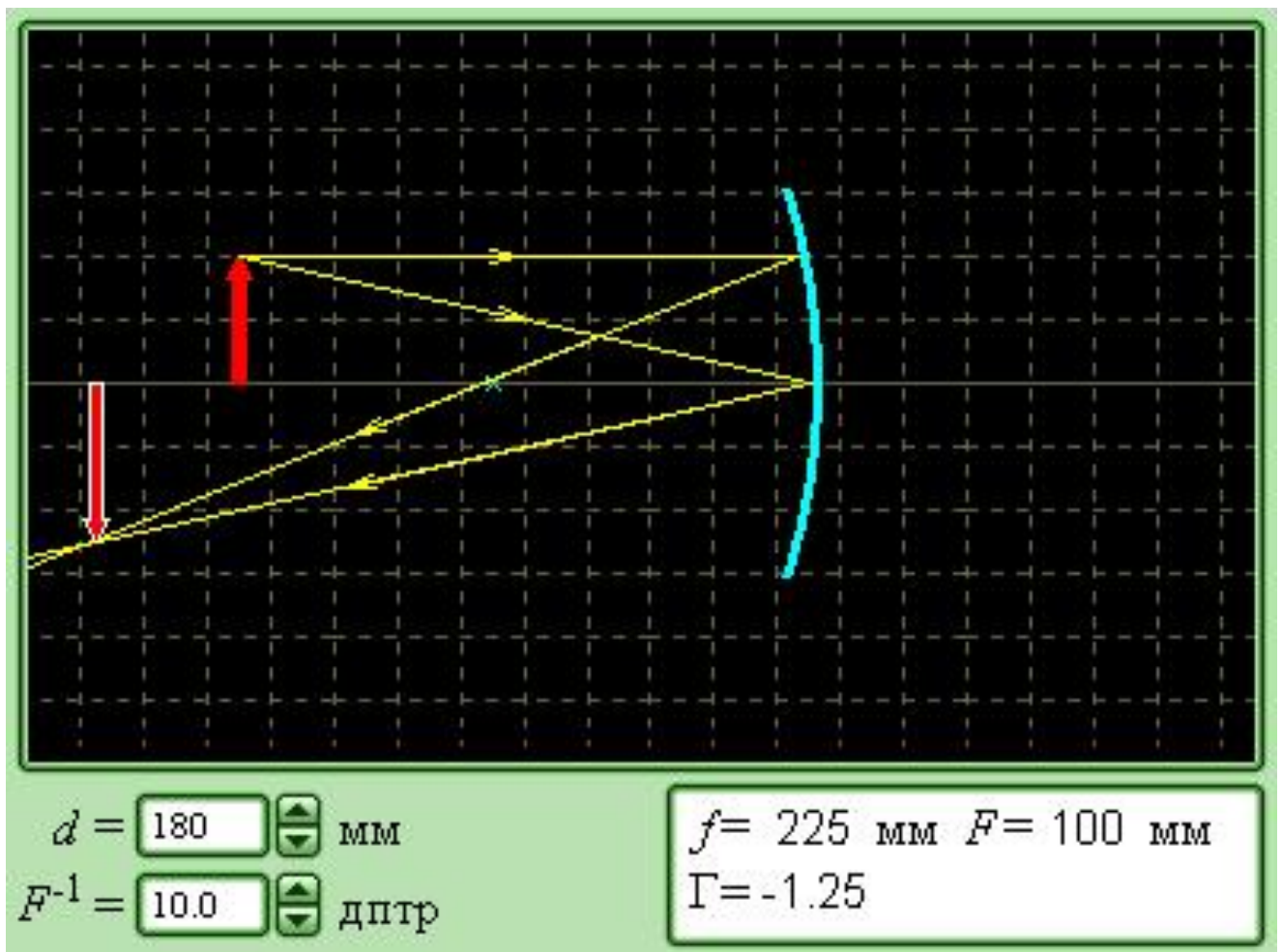


Рисунок 18– Компьютерная модель «Сферическое зеркало»

2. Получить формулу сферического зеркала
3. Каков масштаб принят в данной модели?
4. Каково максимальное и минимальное расстояние от предмета до зеркала?
5. Установить оптическую силу зеркала в соответствии с таблицей 66

Таблица 66 - Варианты выбора оптической силы линзы (собирающей и рассеивающей)

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Оптическая сила	10 -4	8 -8	6 -6	4 -2	2 -10	-2 4	-4 10	-6 2	-8 8	-10 6

6. Изменяя расстояние от предмета до изображения, получить 10 изображений предмета
7. Записывать в таблицу 67 значения расстояния до изображения, увеличение предмета и фокусное расстояние (отдельно для вогнутого и выпуклого зеркал)

Таблица 67 - Исследование зависимости расстояния от предмета до изображения и увеличения от расстояния от линзы до предмета

№ п/п	D, дптр	F, мм	d, мм	f, мм	Г
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
12					
13					
14					
15					

8. Определите размер предмета в модели
9. Построить график зависимости увеличения зеркала от расстояния до предмета
10. Построить график зависимости расстояния до изображения в зависимости от расстояния до предмета
11. Определите, какое максимальное увеличение предмета можно получить в модели. При каких значениях?
12. Сделать выводы по заданию 2
13. **Сделать вывод по работе в целом**

Задание на закрепление

Составить глоссарий по теме «Геометрическая оптика» в объёме 15 терминов и решить задачу из сборника задач по физике Чертова, Воробьёва (в соответствии с номером в журнале):

Таблица 68 – Номера задач для самостоятельного решения

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
№ задачи	28.4	28.6	28.2	28.9	28.5	28.7	28.10	28.1	28.8	28.3

Контрольные вопросы и задания

1. Запишите и объясните формулу сферического зеркала. На какое уравнение оно похоже?

2. Какое изображение даёт плоское зеркало? Сферическое?
3. Начертите изображение прямолинейного отрезка в плоском зеркале
4. Начертите изображение предмета в сферическом вогнутом зеркале для пяти случаев (предмет расположен дальше оптического центра, предмет расположен в оптическом центре, предмет расположен между фокусом и оптическим центром, в фокусе, между фокусом и полюсом)
5. Начертите изображение предмета, даваемое выпуклым зеркалом
6. При каких условиях изображение, даваемое вогнутым (выпуклым) зеркалом, будет действительным? Мнимым?
7. Как отразится от вогнутого (выпуклого) зеркала падающий на него параллельный пучок света параллельно главной оптической оси?
8. Как получить увеличенное изображение предмета при помощи плоского зеркала? Что такое перископ? Где и для чего применяют этот прибор?
9. Где применяют плоские и сферические зеркала?
10. Могут ли существовать зеркала других форм? Почему? Где находят применение отражающие поверхности других видов?

1.12 Изучение законов преломления света различными поверхностями

Учебная цель работы

В оптических деталях оптико-механических приборов встречаются различные поверхности. Наиболее употребительной является *сферическая* поверхность. Кроме сферических применяются *несферические* поверхности тел вращения. Наиболее часто встречаются поверхности второго порядка: эллипсоид, гиперboloид и параболоид вращения.

Несферические поверхности позволяют получить хорошее исправление aberrаций. Так, двухлинзовый конденсор с одной несферической поверхностью даёт лучший в aberrационном отношении результат, чем шестилинзовый сферический.

Торические поверхности находят применение в очковой оптике, параболические — в отражателях, эллиптические — в конденсорах и отражателях.

Несферические поверхности, удовлетворяющие уравнениям высших порядков, применяются в осветительных системах и в объективах в тех случаях, когда необходимо достигнуть особо хорошее исправление aberrаций или получить более простую конструкцию.

Содержание работы

В практической работе предлагается изучить законы геометрической оптики: преломления и отражения, а также явление полного внутреннего отражения; проверить закон преломления, вычисляя отношение синусов; построить зависимость угла преломления от угла падения; построить график

зависимости предельного угла от показателя преломления; рассчитать скорость света в среде и относительную погрешность измерений.

Подготовка к работе

Для успешного выполнения и сдачи работы необходимо подготовить бланк отчёта по работе, подготовить ответы на контрольные вопросы, знать законы и основные понятия геометрической оптики: преломление, отражение, абсолютный и относительный показатели преломления, а также элементарные сведения из школьного курса геометрии.

Входной контроль

1. Что изучает оптика? На какие разделы она делится?
2. Что такое геометрическая оптика? Когда были открыты законы геометрической оптики?
3. Что такое световой луч? Сформулируйте принцип независимости световых пучков
4. Что такое абсолютный показатель преломления? Относительный показатель преломления?
5. Какая среда называется оптически более плотной? Оптически менее плотной?
6. Какой луч называется нулевым? Запишите уравнение нулевого луча
7. Какова зависимость между фокусными расстояниями и показателями преломления сферической поверхности?
8. Запишите уравнение нулевого луча и инвариант Аббе
9. Запишите уравнение углов нулевого луча. Что оно означает?
10. Какая оптическая система называется тонкой?

Порядок выполнения работы

Задание 1. Изучение отражения и преломления света

1. Сделать описание модели (см. рисунок 19) согласно таблице 69
2. В каких пределах можно изменять угол падения луча?
3. Какова цена деления шкалы в модели?
4. Установить положение «Граница воздух-среда»
5. Что можно наблюдать, если показатель преломления равен 1?
6. Задать значение показателя преломления в соответствии с таблицей 70

Таблица 69 - Описание компьютерной модели «Отражение и преломление света»

	Величины							
	Задаваемые				Вычисляемые			
Пределы изменения								
Единица измерения								

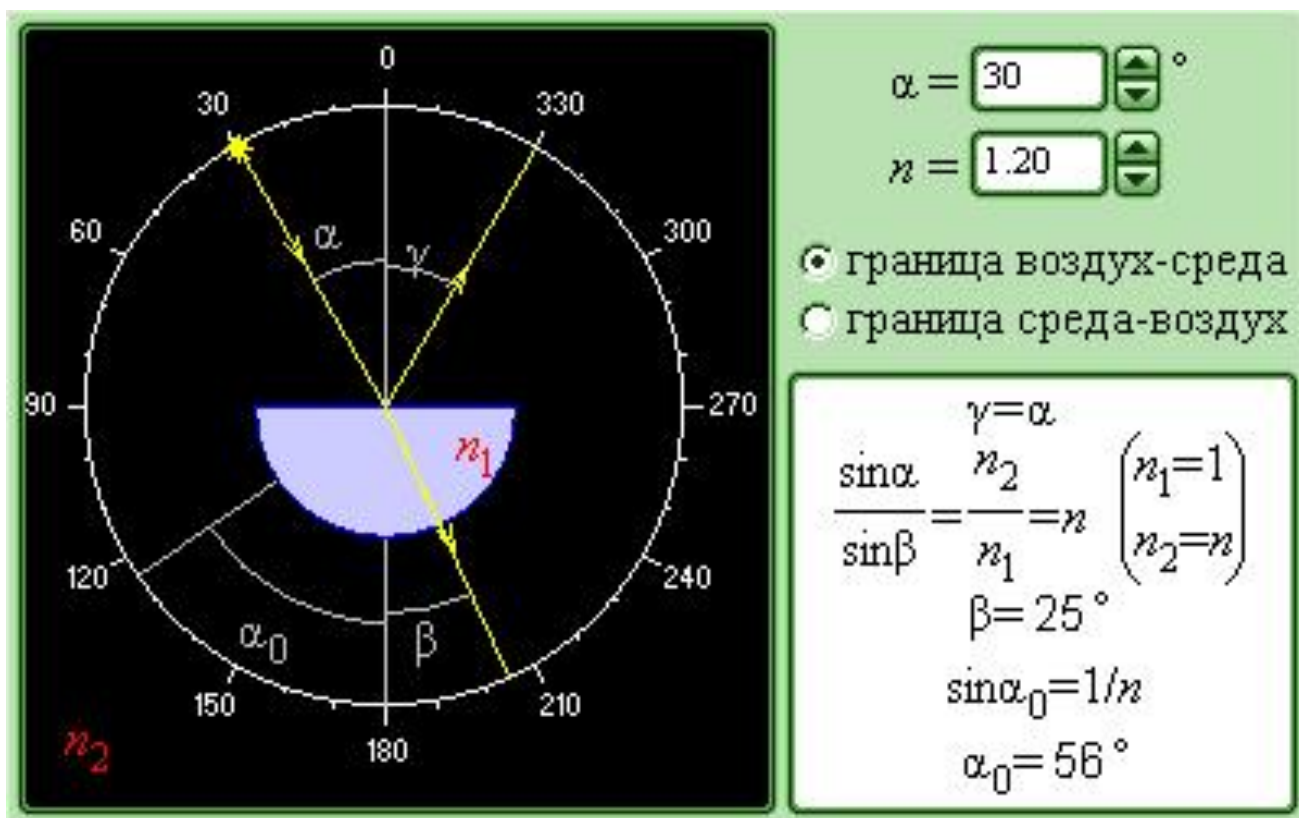


Рисунок 19– Компьютерная модель «Отражение и преломление света»

Таблица 70 – Варианты для показателя преломления

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Показатель преломления	1,05	1,1	1,15	1,2	1,25	1,3	1,35	1,4	1,45	1,5
	1,55	1,6	1,65	1,7	1,75	1,8	1,85	1,9	1,95	2

- Изменять значения угла падения от 0 до 90 каждые 10 градусов
- Записывать значения падающего и преломленного углов в таблицу 71
- Рассчитать синусы углов падения и углов отражения с точностью до 3 знаков после запятой
- Проверить закон преломления, вычисляя отношение синусов (показатель преломления) с точность до 3 знаков после запятой
- Рассчитать скорость света в среде
- Подобрать вещества (по справочнику), показатель преломления которого близок к вашим значениям
- Построить зависимость угла преломления от угла падения (для двух значений показателя преломления на одной координатной плоскости)
- Рассчитать погрешность ε
- Сделать вывод по первому заданию

Таблица 71 – Исследование закона преломления и отражения

№ п/п	n	α	β	γ	$\sin \alpha$	$\sin \beta$	$\sin \alpha / \sin \beta$	v	ε
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									

Задание 2. Изучение полного внутреннего отражения

1. Установить положение «Граница среда-воздух»
2. Задать значение показателя преломления в соответствии с таблицей 70
3. Изменять значения угла падения от 0 до 90 каждые 5 градусов
4. Записывать значения падающего и преломленного углов в таблицу 72

Таблица 72 – Изучение полного внутреннего отражения

№ п/п	n	α	β	α_0
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				

5. Вычислить предельный угол полного отражения
6. Задать значение угла падения в соответствие с таблицей 73

Таблица 73 – Варианты для углов падения

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Угол падения пучка	5 40	8 44	11 47	14 50	17 53	20 56	23 59	26 63	29 66	2 69

7. Изменяя показатель преломления, записывать значения предельного угла полного внутреннего отражения

Таблица 74 – Исследование величины предельного угла отражения от угла падения

№ п/п	Угол падения		n	Угол преломления		Предельный угол
	α_1	α_2		β_1	β_2	α_0
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						
18						
19						
20						

8. Построить график зависимости предельного угла от показателя преломления (для двух углов на одной координатной плоскости)
9. Как зависит предельный угол полного внутреннего от угла падения?
10. Сделать вывод по второму заданию

11. Сделать вывод по работе

Задание на закрепление

Выполнить Задание на закрепление в соответствии с таблицей домашних заданий. Составить глоссарий по теме «Геометрическая оптика» в объёме 15 терминов и решить задачу из сборника задач по физике Чертова, Воробьёва (в соответствии с номером в журнале):

Таблица 75 – Номера задач для самостоятельного решения

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
№ задачи	28.11	28.16	28.13	28.18	28.10	28.15	28.12	28.19	28.17	28.14

Контрольные вопросы и задания

1. Сформулируйте основные законы геометрической оптики.
2. Какое явление называется полным внутренним отражением? При каких условиях оно возможно
3. Что такое граница раздела и плоскость падения?
4. В чём физический смысл показателя преломления?
5. В каких пределах находятся его значения? Может ли он быть меньше 1?
6. Начертите ход лучей в сферической преломляющей поверхности
7. Начертите ход лучей в плоской преломляющей поверхности
8. Что такое плоскопараллельная пластинка?
9. Начертите ход лучей в плоскопараллельной пластинке. Каким свойством она обладает?
10. Что такое клин? Что такое преломляющая призма? В чём их отличие?
11. Начертите ход лучей в клине.
12. Как изменяется пучок лучей после прохождения клина
13. Где применяют явление полного внутреннего отражения?
14. Где применяют призмы?

1.13 Изучение тонкой линзы и системы двух линз

Учебная цель работы

Природа вооружила человека прекрасным оптическим инструментом – глазом. На внутренней поверхности глаза образуется оптическое изображение, воспринимаемое человеком как зрительный образ. Но возможности глаза ограничены. Глаз видит только те предметы, которые расположены непосредственно перед ним на сравнительно близком расстоянии, и не может различить отдельные детали далеко расположенных предметов.

Глаз не видит в темноте. Поэтому человеком были изобретены линзы и из них – различные оптические приборы, при помощи которых возможности человеческого глаза значительно расширились. Самыми простейшими

оптическими приборами являются очки и лупа. В современных оптических устройствах могут применяться системы из десятков линз. В данной работе предлагается исследовать тонкую линзу и систему двух тонких линз.

Содержание работы

При помощи компьютерной модели изучить, как получается изображение при помощи тонких линз и системы линз. Можно изменять фокусное расстояние линз и расстояния предмета до линзы, а также расстояние между линзами в системе.

Подготовка к работе

Для успешного выполнения и сдачи работы необходимо подготовить бланк отчёта по работе, подготовить ответы на контрольные вопросы, знать законы геометрической оптики, понятия линзы, тонкой линзы, фокуса, фокусного расстояния, оптической силы линзы и системы, формулу тонкой линзы, виды линз, теорию идеальной оптической системы, способы построения изображений простейшими собирающими и рассеивающими тонкими линзами, формулу Ньютона, понятия углового и линейного увеличения, знать классификацию оптических систем.

Входной контроль

1. Что такое линза?
2. Какая линза называется собирающей? Рассеивающей?
3. Что такое пространство предметов и пространство изображений?
4. Что такое главная оптическая ось? оптический центр линзы?
5. Что такое фокальная плоскость?
6. Какие точки называются сопряжёнными?
7. Что такое оптическая система?
8. Что относится к конструктивным элементам системы?
9. Что такое аберрации линз?
10. Какие аберрации линз существуют?
11. Какая оптическая система называется идеальной? Можно ли получить идеальную оптическую систему?
12. Сформулируйте положения теории идеальной оптической системы
13. Какая оптическая система называется центрированной?
14. Что такое оптическая ось системы?
15. Что такое передняя и задняя главная плоскость?
16. Какие плоскости называются кардинальными?

Порядок выполнения работы

Задание 1. Изучение тонкой линзы

1. Сделать описание модели (см. рисунок 20) согласно таблице 76

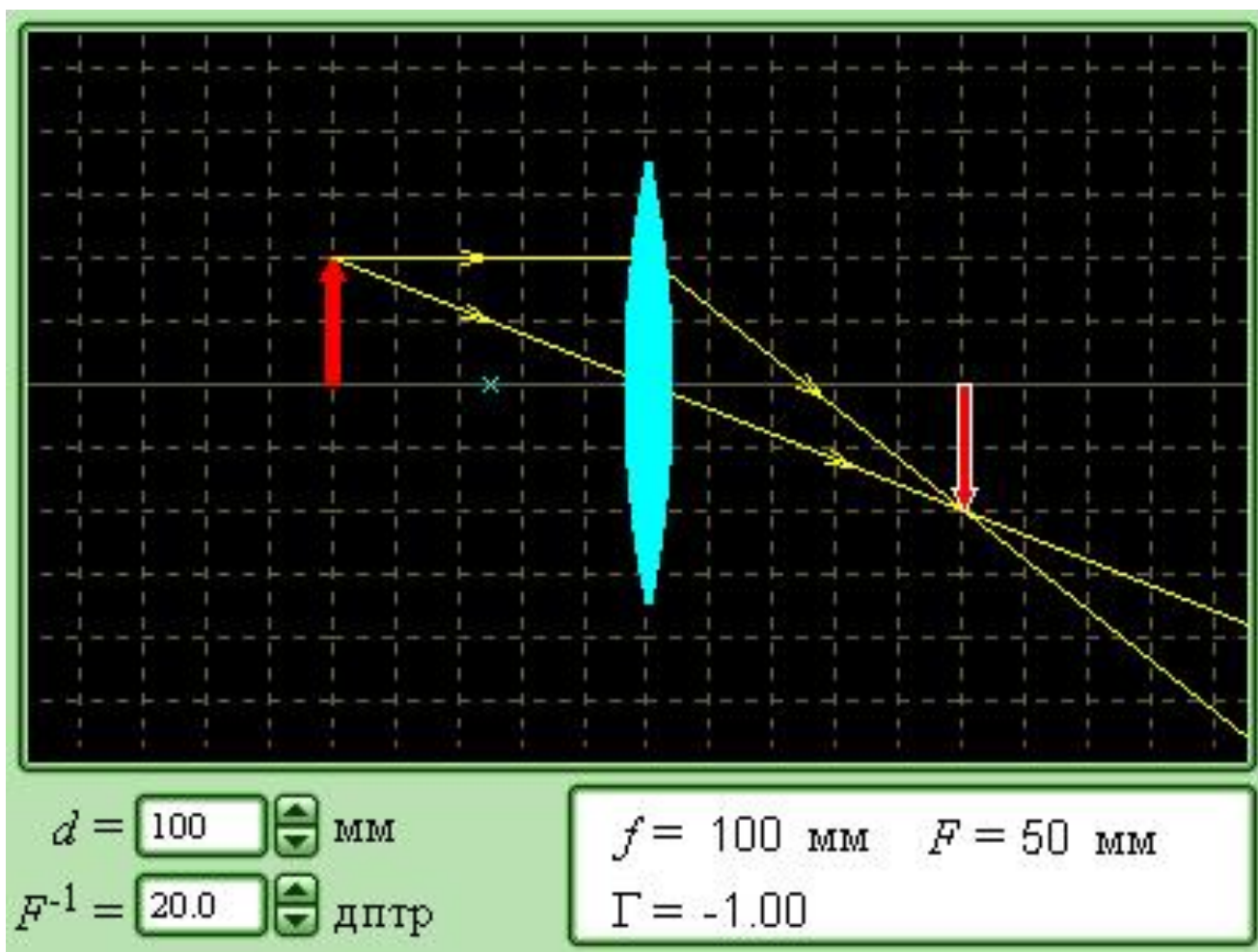


Рисунок 20 - Компьютерная модель «Тонкая линза»

2. Получить формулу тонкой линзы
3. Определить цену деления шкалы модели
4. Найдите размеры предмета

Таблица 76 - Описание компьютерной модели «Тонкая линза»

	Величины							
	Задаваемые				Вычисляемые			
Пределы изменения								
Единица измерения								

5. Каково максимальное и минимальное расстояние от предмета до линзы?
6. Установить оптическую силу линзы в соответствие с таблицей 77

Таблица 77 – Варианты для оптической силы линзы (собирающая и рассеивающая)

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Оптическая сила	10 -4	8 -8	6 -6	4 -2	2 -10	-2 4	-4 10	-6 2	-8 8	-10 6

7. Изменяя расстояние от предмета до линзы, получить 10 изображений предмета
8. В таблицу 78 записывать значения расстояния до изображения, увеличение предмета и фокусное расстояние (для собирающей и рассеивающей линз)

Таблица 78 – Исследование зависимости размеров изображения и увеличения от расстояния от предмета до линзы

№ п/п	D, дптр	F, мм	d, мм	f, мм	Г
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

9. В отчёте по практической работе построить изображение, даваемое тонкой линзой, для одного случая значений расстояния до линзы (произвольное). Сделать чертёж с указанием хода лучей для собирающей и рассеивающей линз
10. Сравнить значения величин: вычисленную, при помощи формулы тонкой линзы, полученную в модели и измеренную линейкой
11. Вычислить относительную погрешность измерения (соответственно для двух случаев – по модели и по формуле) по формуле

$$\varepsilon = \frac{|x_{\text{вычисленное}} - x_{\text{измеренное}}|}{x_{\text{вычисленное}}} \cdot 100\% \quad (2)$$

12. Построить график зависимости увеличения линзы от расстояния до предмета

13. Построить график зависимости расстояния до изображения в зависимости от расстояния до предмета
14. Определите, какое максимальное увеличение предмета можно получить в модели. При каких значениях?
15. Все результаты занести в таблицу. Сделать вывод

Задание 2. Изучение системы двух линз

В данном задании необходимо рассмотреть четыре возможных варианта системы двух линз: две выпуклые линзы, две вогнутые линзы, два варианта расположения выпуклой и вогнутой линз (в зависимости от места положения каждой из них)

1. Сделать описание модели (см. рисунок 21) согласно таблице 79

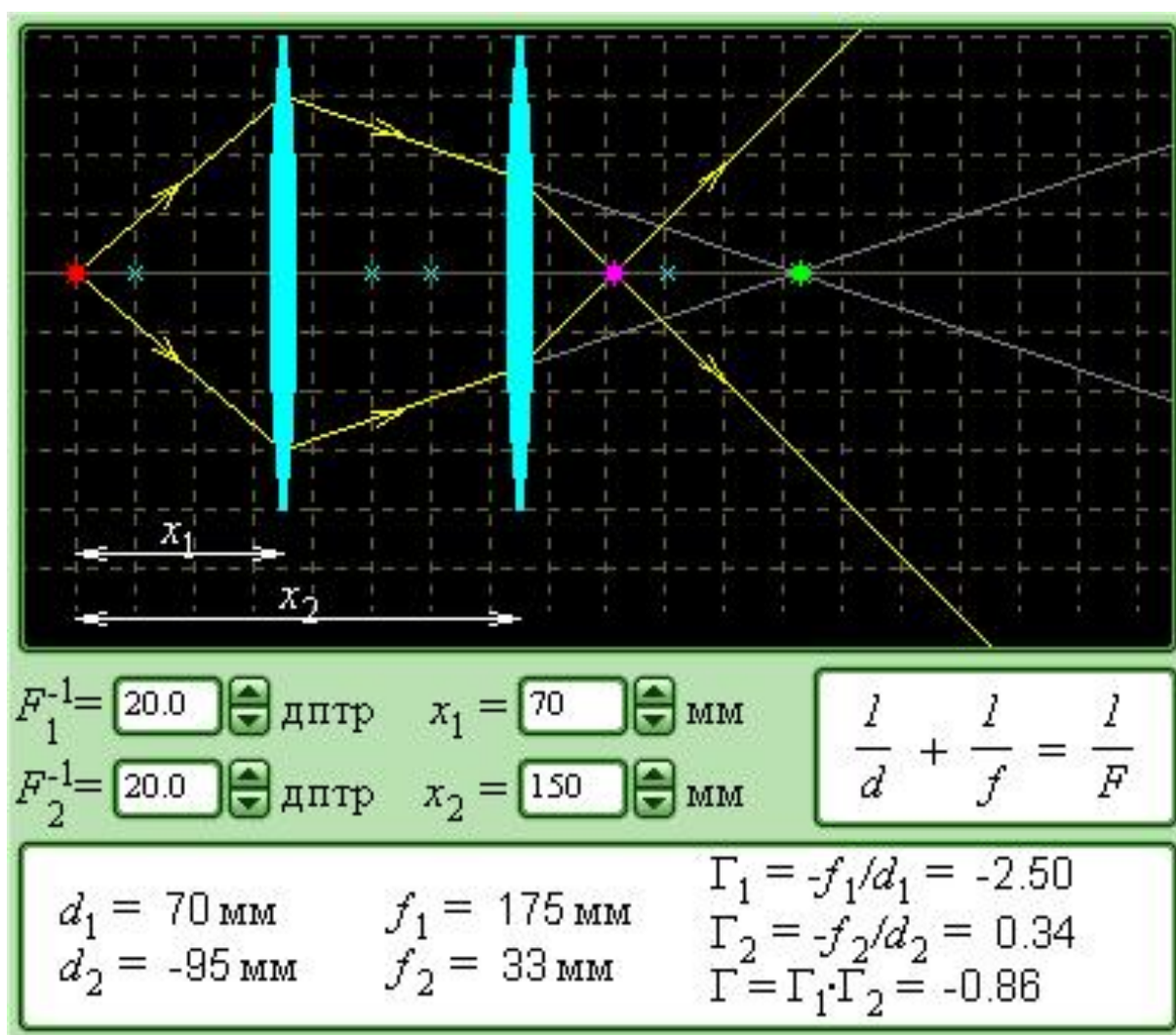


Рисунок 21 – Компьютерная модель «Система двух линз»

2. Расположить первую линзу на расстоянии не более 60 мм от предмета
3. Задать оптическую силу первой линзы, равной 20
4. Задать оптическую силу второй линзы в соответствии с таблицей 80

Таблица 79 - Описание компьютерной модели «Система двух линз»

	Величины							
	Задаваемые				Вычисляемые			
Пределы изменения								
Единица измерения								

Таблица 80 – Варианты фокусного расстояния для собирающей линзы

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Фокусное расстояние	1	3	7	10	13	16	19	22	25	30

5. Изменяя расстояние второй линзы до предмета, получить 10 изображений предмета. При этом необходимо следить, чтобы изображение было действительным

Таблица 81 – Исследование системы двух линз

№	Расстояние первой линзы	Оптическая сила первой линзы	Оптическая сила второй линзы	Расстояние от предмета	Расстояние до изображения	Увеличение
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						

6. Записывать в таблицу значения увеличения системы и расстояние до изображения, даваемое системой (розовая точка)
7. Начертить схематично в отчёте по практической работе ход лучей и построение изображения системой линз. Рассмотреть также получения мнимого изображения
8. Расположить первую линзу на расстоянии не более 60 мм от предмета
9. Задать оптическую силу первой линзы, равной 30

10. Задать оптическую силу второй линзы в соответствии с таблицей 82

Таблица 82 – Варианты фокусного расстояния для рассеивающей линзы

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Фокусное расстояние	-30	-27	-25	-20	-17	-15	-13	-10	-7	-5

11. Изменяя расстояние второй линзы до предмета, получить 10 изображений предмета. При этом необходимо следить, чтобы изображение было действительным
12. Записывать в таблицу значения увеличения системы и расстояние до изображения, даваемое системой
13. Начертить схематично в отчёте по практической работе ход лучей и построение изображения системой линз. Рассмотреть также получения мнимого изображения
14. Расположить вторую линзу на расстоянии 250 мм от предмета
15. Задать оптическую силу второй линзы, равной -30
16. Задать оптическую силу первой линзы в соответствии с таблицей 80
17. Изменяя значение расстояния первой линзы от предмета, получить 10 изображений предмета
18. Записывать в таблицу 21 значения увеличения системы и расстояние до изображения, даваемое системой
19. Начертить схематично в отчёте по практической работе ход лучей и построение изображения системой линз
20. Расположить вторую линзу на расстоянии 250 мм от предмета
21. Задать оптическую силу второй линзы, равной -30
22. Задать оптическую силу первой линзы в соответствии с таблицей 82

Таблица 83 – Исследование системы двух линз

№	Расстояние второй линзы	Оптическая сила первой линзы	Оптическая сила второй линзы	Расстояние от предмета	Расстояние до изображения	Увеличение
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						

23. Изменяя значение расстояния первой линзы от предмета, получить 10 изображений предмета
24. Записывать в таблицу 83 значения увеличения системы и расстояние до изображения, даваемое системой
25. Начертить схематично в отчёте по практической работе ход лучей и построение изображения системой линз
- 26. СДЕЛАТЬ ВЫВОД ПО РАБОТЕ**

Задание на закрепление

Выполнить задание на закрепление в соответствии с таблицей. Составить глоссарий по теме «Линзы и оптические приборы» в объёме 15 терминов и решить задачу из сборника задач по физике Чертова, Воробьёва (в соответствии с номером в журнале):

Таблица 84 – Номера задач для самостоятельного решения

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
№ задачи	28.28	28.21	28.25	28.24	28.22	28.29	28.26	28.20	28.23	28.27

Контрольные вопросы и задания

1. Какие способы построения изображения в тонких линзах существуют (для собирающих и рассеивающих линз)
2. Как строится изображение предмета в системе из двух линз? Чему равна оптическая сила системы?
3. Перечислите и изобразите различные типы линз
4. Какие виды линз существуют? Получите и объясните формулу тонкой линзы
5. Какая аберрация называется комой? Можно ли её устранить?
6. Что такое сферическая аберрация? Как её устраняют?
7. Дайте определение хроматической аберрации и способы её устранения. Что такое апланат?
8. Что такое астигматизм и дисторсия? Как их устраняют?
9. Запишите и объясните формулу Ньютона для линз. Какие типы оптических систем существуют? Охарактеризуйте их
10. Как определяется продольное и линейное увеличение линзы? Как они связаны?

1.14 Изучение оптических приборов

Учебная цель работы

Оптические приборы, созданные человеком, необычайно расширили возможности зрения. Астрономические рефракторы и рефлекторы позволили проникнуть взором в глубины мирового пространства и открыть много новых звезд и звездных скоплений. С помощью этих приборов рассматривают

ближайшие к Земле планеты и наблюдают процессы, происходящие на поверхности Солнца.

Приборы, позволяющие рассматривать далеко расположенные предметы и называемые телескопическими, весьма разнообразны. Среди них приборы для измерения координат движущихся целей, такие, как дальномеры и высотомеры, большая группа геодезических приборов: нивелиры, теодолиты и другие, позволяющие определять координаты точек на земной поверхности.

Невооруженный глаз различает предметы величиной около 0,1 мм. Применение луп повысило эту возможность до 0,01 мм, а с помощью микроскопа стало возможным различать малые объекты величиной до 0,15 мкм. Микроскоп применяется в различных отраслях.

Содержание работы

В данной практической работе предлагается изучить некоторые оптические приборы, такие как микроскоп и телескоп-рефрактор (оптические системы Кеплера и Галилея), изучить их строение, ход лучей в их оптических системах, основные характеристики, правила построения простейших оптических систем данных типов.

Подготовка к работе

Для успешного выполнения и сдачи работы необходимо подготовить бланк отчёта по работе, подготовить ответы на контрольные вопросы, знать законы геометрической оптики, свойства рассеивающих и собирающих линз, формулу тонкой линзы, правила построения изображения в тонких линзах .

Входной контроль

1. Что такое лупа? Чему равно её увеличение? Каково расстояние наилучшего зрения нормального глаза?
2. Что такое окуляр? Какими величинами характеризуется окуляр?
3. Какие типы окуляров существуют? Чем они отличаются? Опишите окуляры Гюйгенса и Рамсдена
4. Какие системы называются микроскопическими? Телескопическими?
5. Опишите устройство микроскопа (механическую и оптическую часть)
6. Какие основные оптические схемы телескопов существуют? Опишите их
7. Что такое система Кеплера и система Галилея? В чём их отличие?
8. Какие виды микроскопов существуют? Что такое компараторы и стереометры?
9. Что такое полезное увеличение? Угловое увеличение? Линейно увеличение?
10. Как определяется увеличение микроскопа? Телескопа?

Порядок выполнения работы

Задание 1. Изучение микроскопа

1. Сделать описание модели (см.рисунок 22) согласно таблице 85
2. Каков масштаб принят в модели?
3. Найти значения фокусных расстояний, при котором предмет и его изображение находятся на одной прямой. Чему при этом равно увеличение?

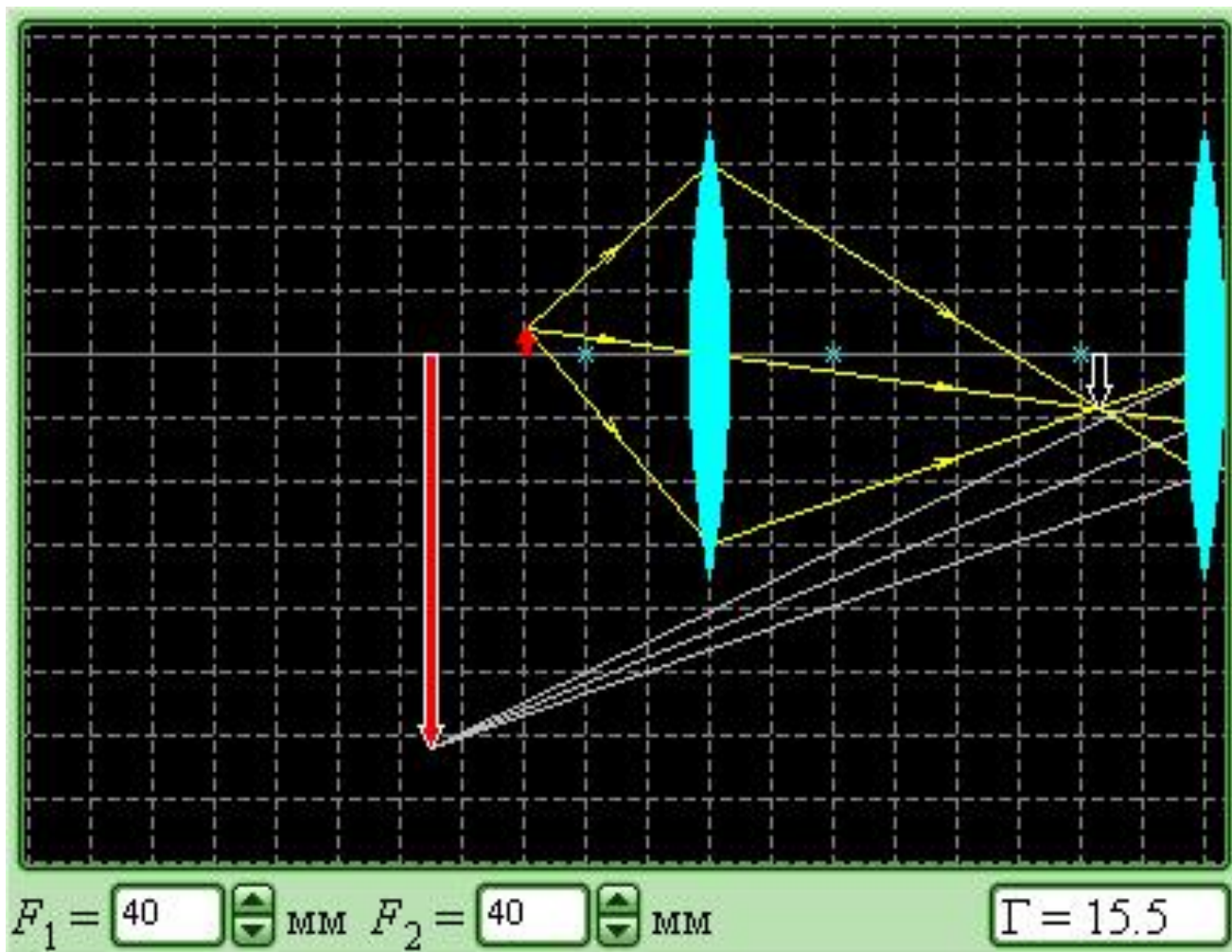


Рисунок 22 – Компьютерная модель «Микроскоп»

Таблица 85 - Описание компьютерной модели «Микроскоп»

	Величины							
	Задаваемые				Вычисляемые			
Пределы изменения								
Единица измерения								

4. Найти максимальное и минимальное увеличения микроскопа в модели. Записать значения фокусных расстояний для этих значений. Какой вывод можно сделать о фокусных расстояниях объектива и окуляра для получения максимального увеличения?
5. Найдите значения фокусных расстояний и увеличение предмета, при котором размер промежуточного изображения составляет одну клетку. Каковы при этом значения фокусных расстояний и увеличение?
6. Найти значения фокусных расстояний и увеличения предмета, при которых он находится на расстоянии 3, 5 и 9 клеток от объектива
7. Найти значения фокусных расстояний и увеличение предмета, при котором величина изображения составляет 60 мм.
8. На каком расстоянии находится предмет от окуляра при наибольшем и наименьшем увеличении микроскопа
9. Найдите размер предмета в модели. Как это можно сделать? Прodelайте 2-3 вычисления.
10. Установив значения фокусных расстояний таким образом, чтобы предмет и его изображение находились на одной прямой, найти угловой увеличение
11. Установить фокусное расстояние окуляра в соответствии с таблицей 86

Таблица 86 – Варианты для фокусного расстояния окуляра микроскопа

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Фокусное расстояние окуляра микроскопа, мм	40 53	42 55	44 57	46 60	48 58	50 41	53 49	55 40	58 43	60 46

12. Изменяя фокусное расстояние объектива, записывать в таблицу значения увеличения
13. По формуле

$$2l = \frac{500 \operatorname{tg} w'}{\Gamma} \quad (3)$$

рассчитать наиболее допустимый угол w' в пространстве изображений. Результаты занести в таблицу

14. Для двух значений фокусного расстояния окуляра построить графики зависимости увеличения микроскопа от фокусного расстояния объектива
15. Сделать вывод

Таблица 87 – Исследование микроскопа

№	Фокусное расстояние окуляра	Фокусное расстояние объектива	Увеличение	Угол w'
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				

Задание 2. Изучение зрительной трубы Кеплера

1. Сделать описание модели (см. рисунок 23) согласно таблице 88

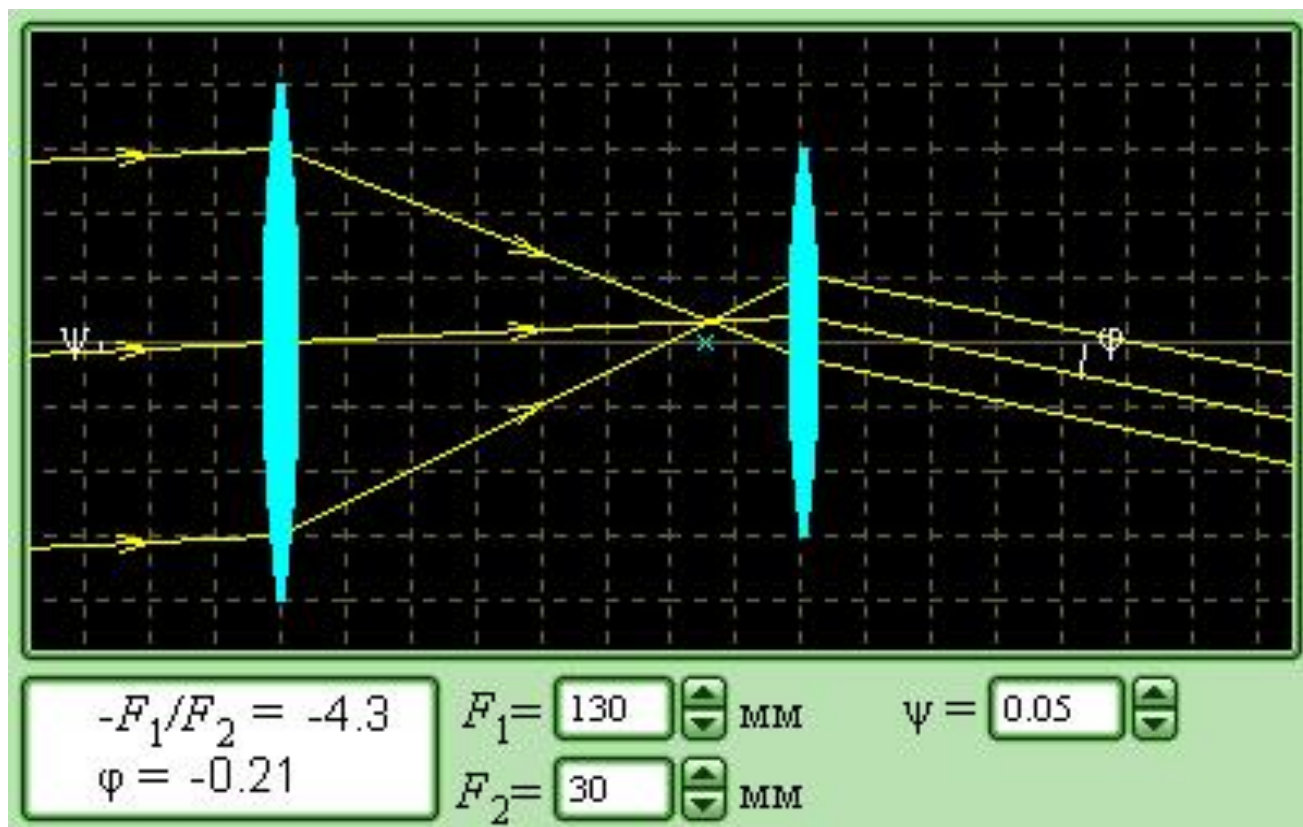


Рисунок 23 – Компьютерная модель «Труба Кеплера»

Таблица 88 - Описание компьютерной модели «Микроскоп»

	Величины							
	Задаваемые				Вычисляемые			
Пределы изменения								
Единица измерения								

2. Установить угол падения пучка света ψ равным нулю
3. Задать фокусное расстояние объектива в соответствии с таблицей 89
4. Изменяя значение фокусного расстояния окуляра записывать значения увеличения трубы Кеплера γ .
5. Сделать 10 опытов

Таблица 89 – Варианты фокусного расстояния для объектива

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Фокусное расстояние объектива	100	106	112	118	125	130	136	140	146	155

6. По формуле $tg w_{\max} = \frac{tg 50}{\gamma}$ рассчитать поле зрения трубы и записать значения в таблицу

Таблица 90 – Исследование увеличения трубы Кеплера

№	Фокусное расстояние объектива	Фокусное расстояние окуляра	Увеличение трубы	Поле зрения трубы
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

7. Построить график зависимости увеличения трубы от фокусного расстояния окуляра при постоянном значении фокусного расстояния объектива
8. Построить график зависимости поля зрения трубы от фокусного расстояния окуляра
9. Установить $\psi = 0,05$
10. Задать значение фокусного расстояния окуляра в соответствие с таблицей 91

Таблица 91 – Варианты фокусного расстояния для окуляра

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Фокусное расстояние окуляра	20	22	24	26	28	30	32	34	36	40

11. Изменяя фокусное расстояние объектива, через каждые 5 мм записывать в таблицу значения увеличения трубы γ и φ
12. По формуле $\gamma = \frac{\varphi}{\psi} = -\frac{F_1}{F_2}$ рассчитать значения γ и записать в таблицу
13. Рассчитать погрешность между полученным значением γ в модели и рассчитанным
14. Построить график зависимости углового увеличения φ от фокусного расстояния объектива
15. Задать фокусное расстояние окуляра в соответствие с таблицей 91
16. Задать фокусное расстояние объектива в соответствие с таблицей 89
17. Изменяя ψ от -0,05 до 0,05, записывать значения угла φ

Таблица 92 – Исследование трубы Кеплера

№	Угол ψ	Фокусное расстояние окуляра	Фокусное расстояние объектива	Угол φ	Угол γ
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

18. Построить график зависимости угла φ от угла ψ

16. Сделать выводы по работе

Задание на закрепление

Выполнить Задание на закрепление в соответствии с таблицей домашних заданий. Составить глоссарий по теме «Оптические приборы» в объёме 15 терминов и решить задачу из сборника задач по физике Чертова, Воробьёва (в соответствии с номером в журнале):

Таблица 93 – Номера задач для самостоятельного решения

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
№ задачи	28.49	28.51	28.44	28.48	28.46	28.52	28.47	28.50	28.45	28.42

Контрольные вопросы и задания

1. Начертите ход лучей в микроскопе. Какова обычно длина тубуса микроскопа?
2. Какими величинами характеризуется микроскоп? Охарактеризуйте эти величины
3. Какое максимальное увеличение можно получить при помощи световых микроскопов? Почему?
4. Что такое разрешающая способность? Как определяется разрешающая способность оптических приборов?
5. Какие ещё микроскопы, кроме световых существуют? Каков принцип их действия? Какое увеличение они дают?
6. Какими величинами характеризуется телескоп? Охарактеризуйте их
7. Начертите ход лучей в оптических системах Кеплера, Галилея и в телескопе рефлекторе
8. Перечислите основные типы телескопических приборов
9. Что такое оборачивающая система? Для чего она служит?
10. Как рассчитываются габариты телескопа? От чего они зависят?

1.15 Изучение дифракции света

Учебная цель работы

Многие наблюдаемые нами явления говорят о том, что свет распространяется прямолинейно. Солнечный луч, луч прожектора, луч лазера ассоциируются в нашем сознании с прямыми или почти прямыми линиями. Прямолинейность распространения — одно из главных и наиболее очевидных свойств света. Несомненно, именно оно породило в свое время представление о том, что свет представляет собой поток частиц. Между тем, некоторые весьма тонкие оптические явления и эксперименты указывают на нарушение закона

прямолинейного распространения света. Так, солнечный луч или луч лазера всегда обладает пусть малой, но конечной расходимостью. Граница светового пучка, граница между светом и тенью никогда не бывает резкой, а всегда имеет пусть малую, но конечную ширину. Отклонения от геометрической оптики обуславливаются волновой природой света. Поэтому изучением связанных с этими отклонениями явлений занимается волновая, или физическая, оптика.

Содержание работы

В работе предлагается пронаблюдать дифракционные картины от различных препятствий: иглы, щели, шарика, отверстия. Качественно проследить как изменяется вид дифракционной картины при изменении условий: длины волны монохроматического излучения и размера препятствий (диаметра шарика и отверстия и ширины щели и иглы). Качественно рассмотреть метод зон Френеля.

Подготовка к работе

Для успешного выполнения и сдачи работы необходимо подготовить бланк отчёта по работе, подготовить ответы на контрольные вопросы, знать понятия дифракции, виды дифракции и условия её наблюдения.

Входной контроль

1. Что изучает волновая оптика? Какие явления доказывают волновую природу света?
2. Как менялись взгляды на физическую природу света? Каковы они в настоящее время?
3. Что такое дифракция? Какие виды дифракции существуют? В чём их отличие?
4. Опишите схемы для наблюдения дифракции Френеля и Фраунгофера
5. Каковы условия наблюдения дифракционных явлений? Какова задача теории дифракции?
6. Сформулируйте принцип Гюйгенса. В чём состояло его значение? В чём его недостаток?
7. Сформулируйте принцип Гюйгенса-Френеля? В чём его значение и отличие от принципа Гюйгенса?
8. Каковы критерии наблюдения дифракции Френеля и Фраунгофера?
9. Что такое зоны Френеля? Что такое число Френеля?
10. Каков критерий применимости геометрической оптики? Когда волновая оптика переходит в геометрическую?

Порядок выполнения работы

Задание 1. Наблюдение дифракции от препятствий

1. Сделать описание модели (см. рисунок 24) согласно таблице 94

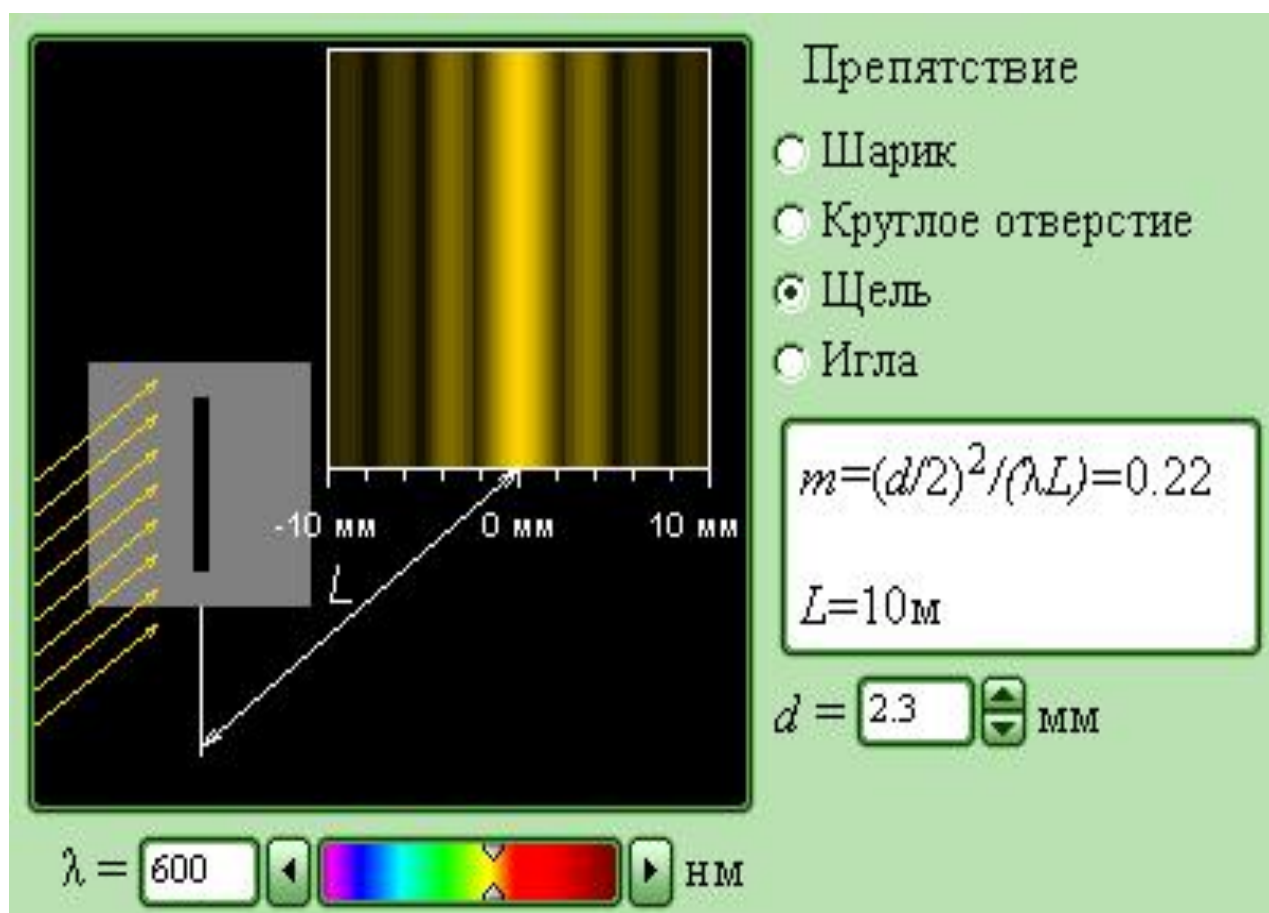


Рисунок 24 – Компьютерная модель «Дифракция света»

Таблица 94 – Описание компьютерной модели «Дифракция света»

	Величины							
	Задаваемые				Вычисляемые			
Пределы изменения								
Единица измерения								

- Установить в модели препятствие «шарик»
- Установить минимальное значение диаметра шарика
- Изменяя длину волны монохроматического света от красного до фиолетового, наблюдать изменение вида дифракционной картины
- Установить максимальное значение диаметра шарика
- Изменяя длину волны монохроматического света от красного до фиолетового, наблюдать изменение вида дифракционной картины
- Сделать вывод по наблюдениям
- Таким же образом, как п. 3-7, пронаблюдать дифракцию света на препятствиях «круглое отверстие», «щель» и «игла»

Таблица 95 – Наблюдение дифракции света

Вид препятствия	Размер препятствия	Наблюдения	Число Френеля
Шарик	Минимальный		
	Максимальный		
Круглое отверстие	Минимальный		
	Максимальный		
Щель	Минимальный		
	Максимальный		
Игла	Минимальный		
	Максимальный		

9. Сделать вывод по наблюдениям
10. В каких пределах изменяется безразмерный параметр m в модели в зависимости от изменения длины волны и ширины препятствия?

Задание 2. Наблюдение зон Френеля

1. Сделать описание модели (см. рисунок 25) согласно таблице 96

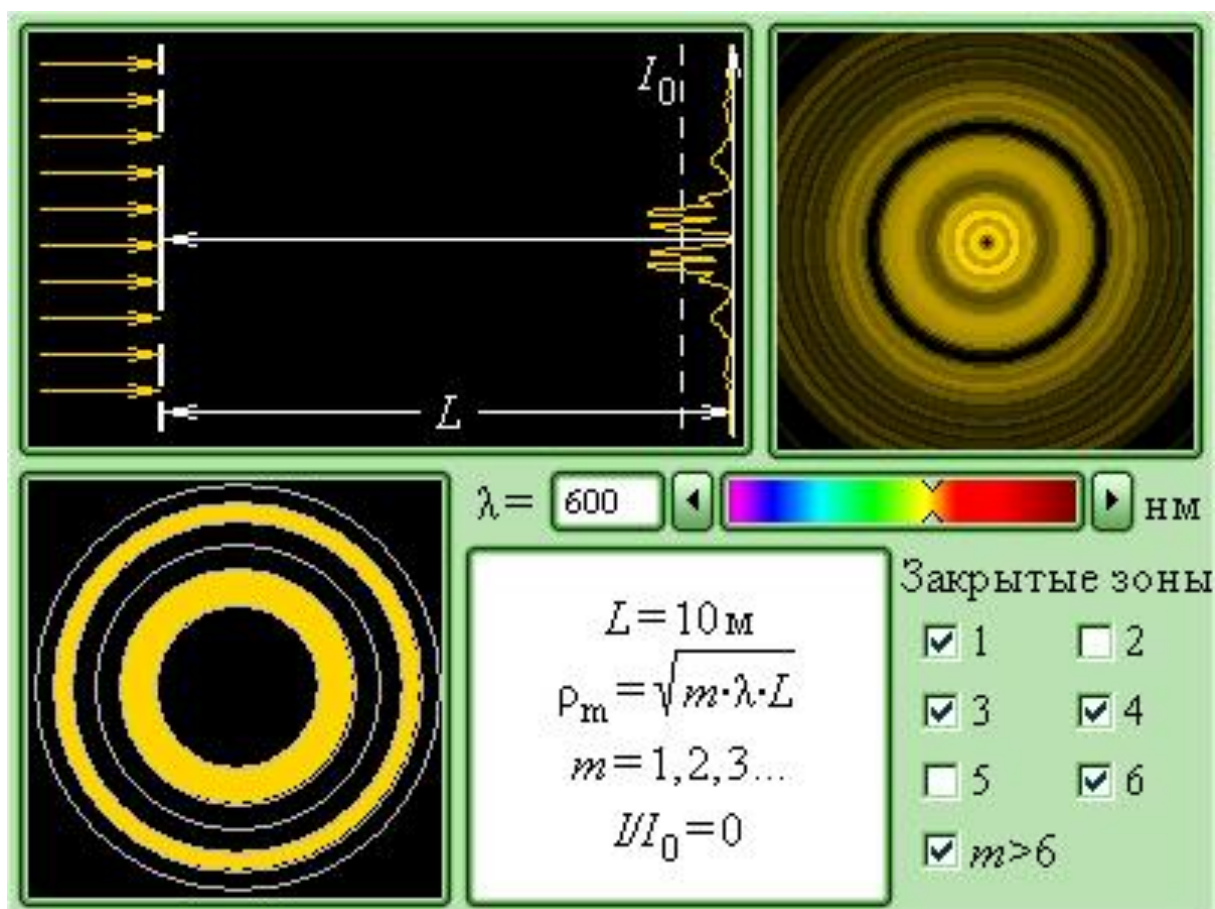


Рисунок 25 – Компьютерная модель «Зоны Френеля»

Таблица 96 – Описание компьютерной модели «Зоны Френеля»

	Величины							
	Задаваемые				Вычисляемые			
Пределы изменения								
Единица измерения								

2. Открыть все зоны Френеля
3. Закрывая и открывая последовательно зоны с 1 по 6, наблюдать изменение дифракционной картины и значения отношения интенсивностей записывать в таблицу
4. Закрывать первую зону Френеля
5. Закрывая и открывая последовательно зоны со 2 по 6, наблюдать изменение дифракционной картины и значения отношения интенсивностей записывать в таблицу
6. Закрывать первые две зоны Френеля
7. Закрывая и открывая последовательно зоны с 3 по 6, наблюдать изменение дифракционной картины и значения отношения интенсивностей записывать в таблицу

Таблица 97 – Изучение зон Френеля

№	Закрытая зона	Закрывающиеся зоны	Наблюдения	I/I_0
	1	2		
		3		
		4		
		5		
		6		
		m>6		
	2	1		
		3		
		4		
		5		
		6		
		m>6		
	3	1		
		2		
		3		
		4		

Продолжение таблицы 97

		5		
		6		
		m>6		
	4	1		
		2		
		3		
		5		
		6		
		m>6		
	5	1		
		2		
		3		
		4		
		6		
		m>6		
	6	1		
		2		
		3		
		4		
		5		

8. Наблюдения записать в бланк отчёта
9. Закрыть все чётные, а затем все нечётные зоны Френеля. Наблюдения и значения отношения интенсивностей записать в бланк отчёта
10. При каких условиях отношения интенсивностей максимально и минимально?

Задание на закрепление

Выполнить Задание на закрепление в соответствии с таблицей домашних заданий. Составить глоссарий по теме «Дифракция. Дифракционные приборы» в объёме 25 терминов и решить задачу из сборника задач по физике Чертова, Воробьёва (в соответствии с номером в журнале):

Таблица 98 – Номера задач для самостоятельного решения

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
№ задачи	31.3	31.7	31.11	31.5	31.8	31.2	31.6	31.10	31.4	31.12

Контрольные вопросы и задания

1. Опишите дифракционную картину от щели, иглы, круглого отверстия и шарика (диска)

2. Как меняется дифракционная картина при изменении ширины щели (иглы)? Диаметра отверстия (шарика)?
3. Как меняется дифракционная картина от щели, иглы, круглого отверстия и шарика при изменении длины волны падающего света?
4. Как распределяется интенсивность света при дифракции от щели, иглы, круглого отверстия и шарика?
5. Что такое «пятно Пуассона»? В каком случае оно может наблюдаться? Как открытие пятна Пуассона повлияло на развитие представлений о природе света?
6. Как определяются радиусы 1 и n-ой зон Френеля? Как распределяется интенсивность между зонами Френеля?
7. Как определяется площадь зон Френеля? Как распределяются амплитуды колебаний в зависимости номера зоны Френеля?
8. Что такое и где применяют зонную пластинку?
9. Какой прибор называется дифракционной решёткой? Формула дифракционной решётки. Что такое разрешающая способность?
10. Что такое дисперсия (как характеристика прибора)? Виды дисперсии: линейная, угловая.

1.16 Изучение интерференции света

Учебная цель работы

Волновые свойства света наиболее отчётливо обнаруживают себя в интерференции и дифракции. Эти явления характерны для волн любой природы и сравнительно просто наблюдаются на опыте для волн на поверхности воды или звуковых волн. Наблюдать же интерференцию и дифракцию световых волн можно лишь при определённых условиях. Интерференционные явления, исторически послужившие доказательством волновой теории света, и в наши дни имеют важные практические применения, например в спектроскопии и метрологии.

Содержание работы

В работе предлагается пронаблюдать интерференционную картину на примере колец Ньютона в монохроматическом свете, изучить изменение вида интерференционных колец в зависимости от длины волны света и радиуса кривизны

Подготовка к работе

Для успешного выполнения и сдачи работы необходимо подготовить бланк отчёта по работе, подготовить ответы на контрольные вопросы, знать понятия монохроматичности, когерентности, интерференции, оптической и геометрической разности хода, условия максимумов и минимумов

интерференции; понимать объяснение интерференционных явлений, исходя из волновых представлений о природе света.

Входной контроль

1. Какая волна называется монохроматическая? Запишите уравнение монохроматической волны
2. Какие источники называются когерентными? Виды когерентности. Способы получения когерентных источников
3. Что такое интерференция? Какие условия должны выполняться для наблюдения интерференции?
4. Как определяется ширина интерференционной полосы? Что такое поле интерференции?
5. Что такое геометрическая разность хода? Оптическая разность хода?
6. В чём заключается физический смысл разности хода? Сформулируйте условия максимумов и минимумов интерференции
7. Что такое кольца Ньютона? Какой вид они имеют при освещении белым светом? Монохроматическим светом?
8. Как определяется интенсивность, создаваемую двумя источниками света, в результате их интерференции?
9. Как получить интерференционную картину от двух естественных источников света? Ответ пояснить
10. Как определяется видность (контрастность) интерференционной картины? Что такое локализованная и нелокализованная интерференционная картина?

Порядок выполнения работы

Задание 1. Изучение колец Ньютона

1. Сделать описание модели (см. рисунок 26) согласно таблице 99

Таблица 99 – Описание компьютерной модели «Интерференция света»

	Величины							
	Задаваемые				Вычисляемые			
Пределы изменения								
Единица измерения								

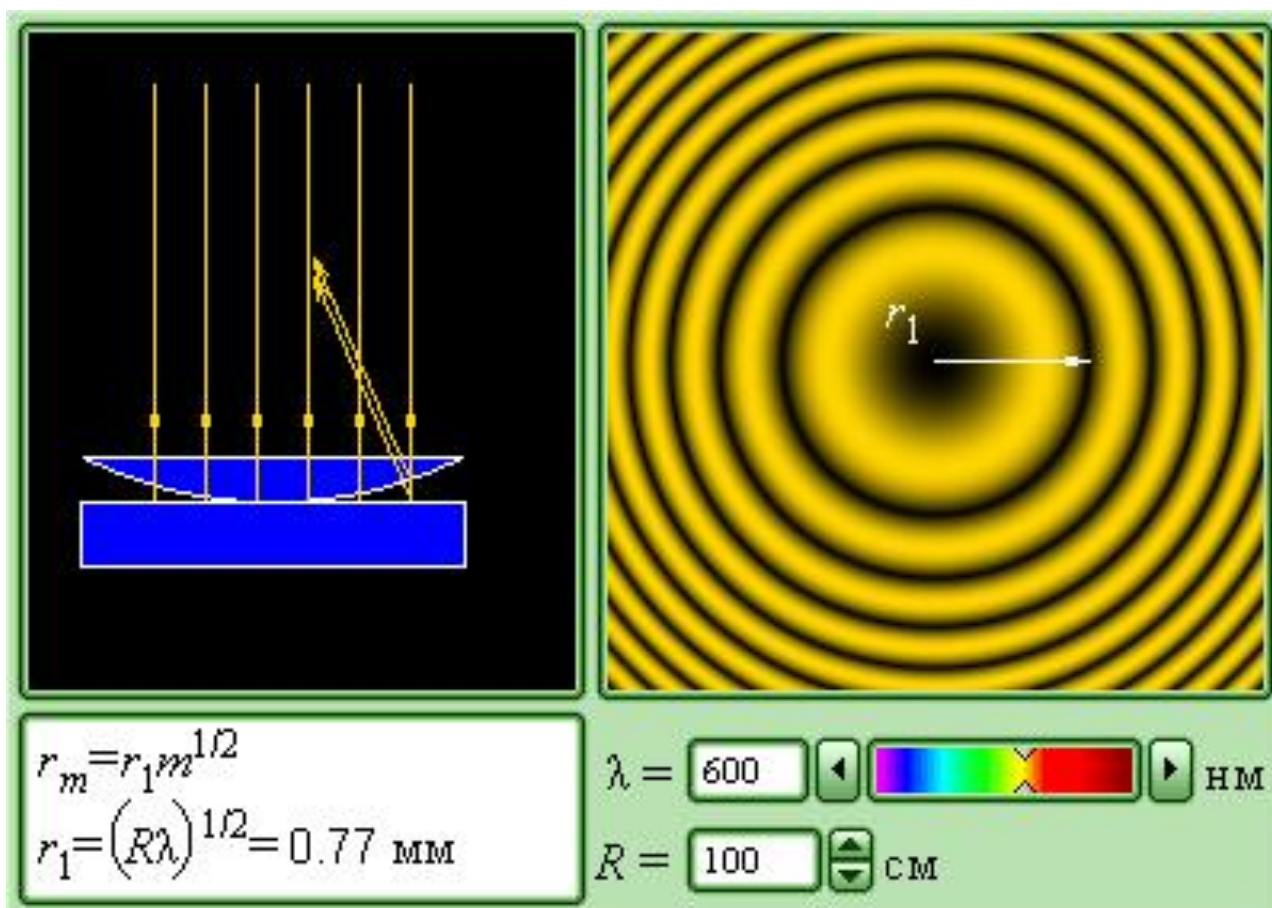


Рисунок 26 – Компьютерная модель «Интерференция света»

2. Установить значение радиуса кривизны линзы в соответствие с таблицей 100
3. Изменяя длину волны света от минимального до максимального значения наблюдать за изменением вида интерференционной картины, записывать в таблицу значения радиуса первого кольца. Получить не менее 10 значений
4. Найти и записать в таблицу радиусы $m+3$ и $m+7$ колец, где m – номер варианта. Найти расстояния между этими кольцами
5. Построить график зависимости радиуса первого кольца от длины волны падающего света при постоянном радиусе кривизны линзы
6. Задать длину падающего монохроматического света в соответствие с таблицей 102

Таблица 100 – Варианты для радиусов кривизны линзы

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Радиус кривизны линзы	200 50	185 65	170 80	155 95	140 125	125 110	110 140	95 155	80 170	75 185

Таблица 101 – Наблюдение колец Ньютона

№	Радиус кривизны линзы	Длина волны	Радиус первого кольца
1	Первый радиус	Фиолетовый	
2		Синий	
3		Голубой	
4		Зелёный	
5		Жёлтый	
6		Оранжевый	
7		Красный	
1	Второй радиус	Фиолетовый	
2		Синий	
3		Голубой	
4		Зелёный	
5		Жёлтый	
6		Оранжевый	
7		Красный	
1	Третий радиус	Фиолетовый	
2		Синий	
3		Голубой	
4		Зелёный	
5		Жёлтый	
6		Оранжевый	
7		Красный	
1	Четвёртый радиус	Фиолетовый	
2		Синий	
3		Голубой	
4		Зелёный	
5		Жёлтый	
6		Оранжевый	
7		Красный	

Таблица 102 – Варианты для длины волны падающего света

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Длина волны	380	392	404	416	428	440	452	464	476	488
	500	512	524	536	548	560	572	584	596	608
	620	632	644	656	668	680	692	704	716	728

7. Изменяя радиус кривизны линзы от максимального до минимального значения наблюдать за изменением вида интерференционной картины, записывать в таблицу значения радиуса первого кольца. Получить не менее 10 значений (для каждой длины волны)

Таблица 103 – Наблюдение колец Ньютона

№	Длина волны	Радиус кривизны	Радиус первого кольца
1	Первая длина волны		
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
1	Вторая длина волны		
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
1	Третья длина волны		
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			

8. Построить график зависимости радиуса первого кольца от радиуса кривизны линзы для трёх значений длины волны (семейство кривых)
9. При каких условиях наблюдать кольца Ньютона удобнее всего? Почему?
10. Сделать вывод об изменении вида интерференционной картины при изменении параметров

Задание 2. Опыт Юнга

1. Сделать описание модели (см. рисунок 27) согласно таблице 104

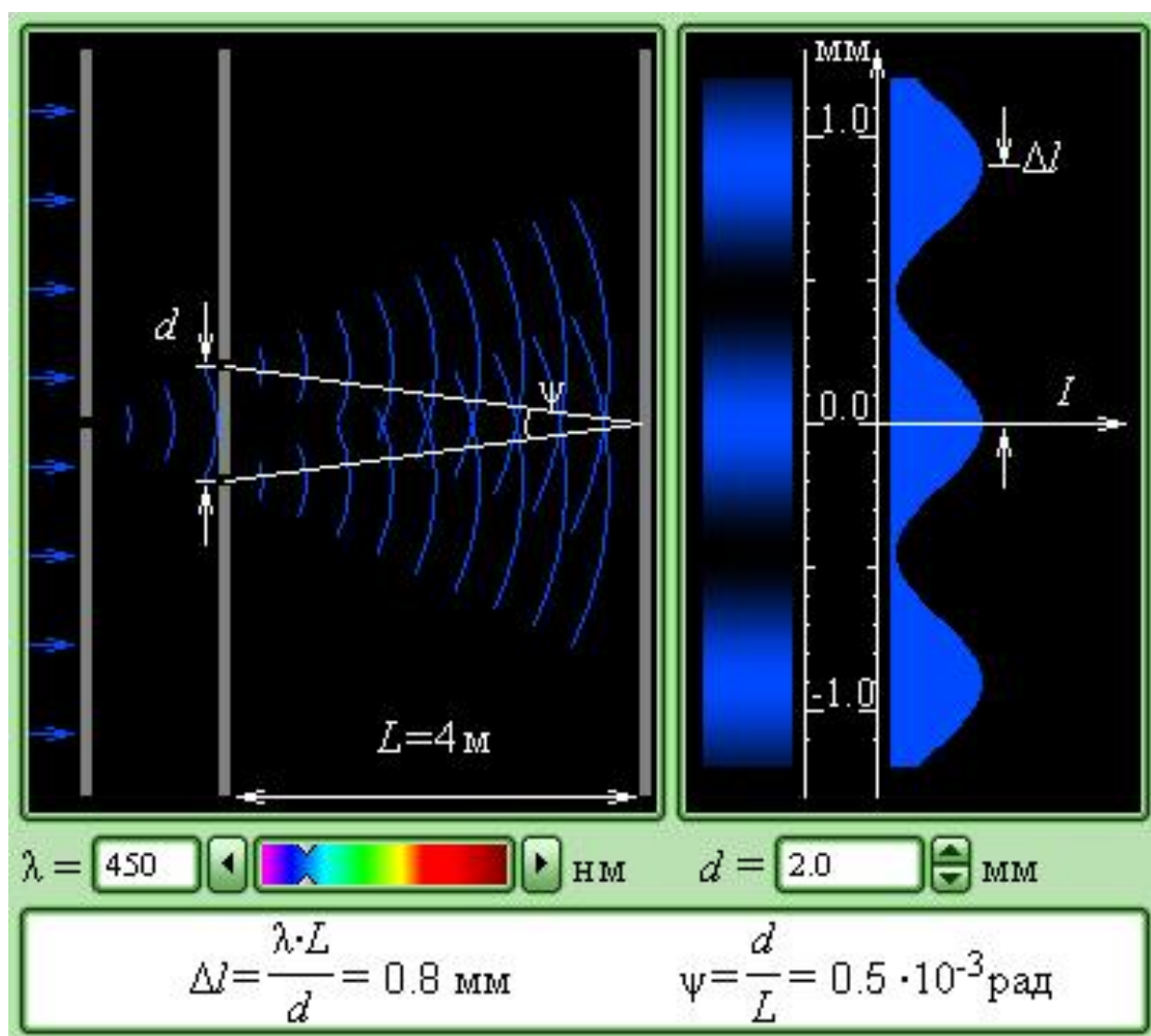


Рисунок 27 – Компьютерная модель «Опыт Юнга»

1. Задать расстояние между щелями в соответствии с таблицей 105
2. Изменяя длину волны монохроматического света от фиолетового до красного, наблюдать как изменяется вид интерференционной картины, записывать значения расстояния между максимумами Δl и угла ψ в таблицу 106

Таблица 104 – Описание компьютерной модели «Интерференция света»

	Величины							
	Задаваемые				Вычисляемые			
Пределы изменения								
Единица измерения								

Таблица 105 – Варианты для расстояния между щелями

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Расстояние между щелями	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,3	2,5	2,7	3,0

3. Построить график зависимости угла ψ от длины волны падающего света

Таблица 106 – Наблюдение интерференции света

№	Расстояние между щелями	Длина волны	Расстояние между полосами	Угол ψ
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

4. Задать длину падающего монохроматического света в соответствие с таблицей 102
5. Изменяя расстояние между щелями d , наблюдать изменение интерференционной картины, записывать в таблицу 107 значения ΔI и ψ

Таблица 107 – Наблюдение интерференции света

№	Длина волны	Расстояние между щелями	Расстояние между полосами	Угол ψ
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

6. Построить график зависимости ширины интерференционной полосы Δl от длины волны падающего света
7. Сделать выводы по работе

Задание на закрепление

Выполнить Задание на закрепление в соответствии с таблицей домашних заданий. Составить глоссарий по теме «Интерференция света. Интерференционные приборы» в объёме 15 терминов и решить задачу из сборника задач по физике Чертова, Воробьёва (в соответствии с номером в журнале):

Таблица 108 – Номера задач для самостоятельного решения

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
№ задачи	30.13	30.30	30.9	30.11	30.16	30.32	30.10	30.20	30.31	30.12

Контрольные вопросы и задания

1. Опишите классические опыты по наблюдению интерференции света: опыт Юнга, бипризмы и зеркала Френеля, зеркало Ллойда, билинза Бийе
2. Как определяется расстояние между максимумами интенсивности в интерференционной картине опыта Юнга? Между минимумами интенсивности?
3. Как изменяется вид интерференционной картины в опыте Юнга при изменении параметров: расстояния до экрана наблюдения, длины монохроматического света, расстояния между щелями (отверстиями)?
4. Какие виды интерференционных полос существуют?
5. При каких условиях можно наблюдать каждый вид полос?
6. Как изменяется вид колец Ньютона при изменении длины волны падающего монохроматического света, радиуса кривизны линзы?
7. Как определяются радиусы светлых и тёмных колец Ньютона?
8. Что такое полосы равной толщины?
9. Что такое полосы равного наклона?
10. Опишите получение интерференционной картины в тонких плёнках и клине
11. Какие приборы называются интерферометрами?
12. Какие интерферометры существуют?
13. Где и для чего применяют интерференционные приборы?
14. Опишите схемы и принцип действия интерферометров Майкельсона и Фабри-Перо
15. Где проявляется явление интерференции в природе?
16. Как явление интерференции используется в технике?

1.17 Изучение поляризации света

Учебная цель работы

Методы исследования структуры вещества с помощью многочисленных *поляризационных приборов* основаны на явлении поляризации света. По изменению степени поляризации (деполяризации) света при рассеянии и люминесценции можно судить о тепловых и структурных флуктуациях в веществе, флуктуации концентрации растворов, о внутри- и межмолекулярной передаче энергии, структуре и расположении излучающих центров и т. д.

Кроме этого применяются *поляризационно-оптический метод* исследования напряжений, возникающих в твёрдых телах (напр. при механических нагрузках), по изменению поляризации прошедшего через тело света, а так же метод исследования свойств поверхности тел по изменению поляризации при отражении света (*эллипсометрия*). В кристаллооптике поляризационные методы используются для изучения структуры кристаллов, в химической промышленности - для контроля при производстве оптически активных веществ, в оптическом приборостроении - для повышения точности отсчётов приборов.

Содержание работы

В данной работе предлагается на компьютерной модели изучить явление поляризации проверить закон Малюса.

Подготовка к работе

Для успешного выполнения и сдачи работы необходимо подготовить бланк отчёта по работе, подготовить ответы на контрольные вопросы, знать понятия поляризации, естественного и поляризованного света, плоскости колебания и плоскости поляризации, изотропии, анизотропии; знать законы Малюса и Брюстера.

Входной контроль

1. Что такое поляризация? Дайте определения видов поляризации
2. Какой свет называется естественным? Чем он отличается от поляризованного?
3. Какой свет называется частично поляризованным? Как связана интенсивность естественного света с линейно поляризованным?
4. Как определяется степень поляризации?
5. Что такое плоскость колебаний? Плоскость поляризации?
6. Какой прибор называется поляризатором? Анализатором? В чём их сходства и отличия?
7. В чём заключается явление Брюстера? Запишите закон Брюстера
8. Опишите опыт с кристаллом турмалина. Сформулируйте закон Малюса

9. Что такое явление двойного лучепреломления? В каких веществах его можно наблюдать?
10. Что такое вращение плоскости поляризации? При каких условиях его можно наблюдать?

Порядок выполнения работы

1. Сделать описание модели (см. рисунок 28) согласно таблице 109

Таблица 109 – Описание компьютерной модели «Поляризация света»

	Величины							
	Задаваемые				Вычисляемые			
Пределы изменения								
Единица измерения								

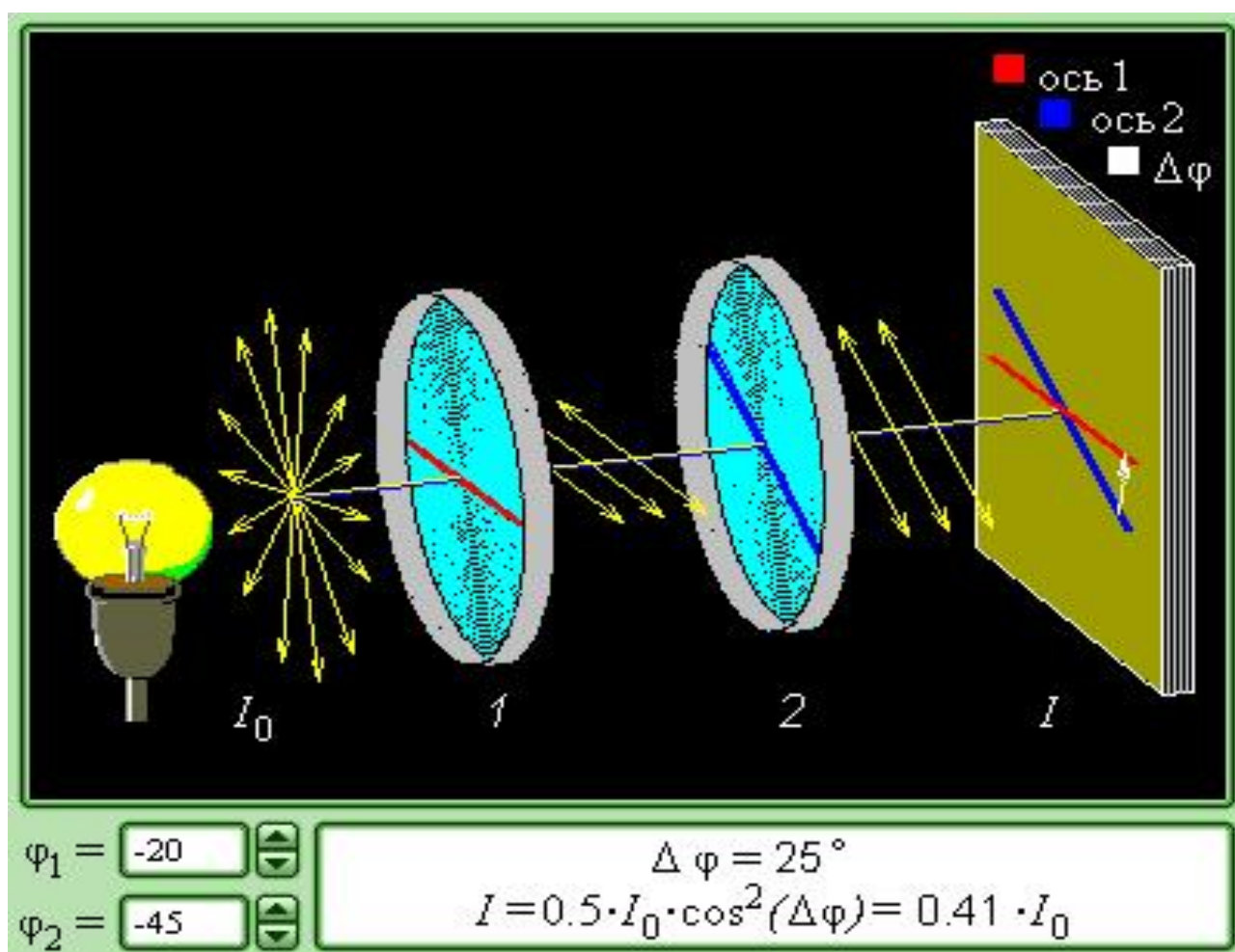


Рисунок 28 – Компьютерная модель «Поляризация света»

2. Задать положение поляризатора (угол φ_1) в соответствие с таблицей 110

Таблица 110 – Варианты для угла поворота поляризатора

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Угол поляризатора φ_1	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90

3. Изменяя положение анализатора в пределах от -90 до 90 записывать отношения интенсивностей естественного и прошедшего света
4. Заполнить таблицу 40

Таблица 111 – Изучение поляризации света

№	φ_1	φ_2	$\Delta \varphi$	$\cos \Delta \varphi$	$\cos^2 \Delta \varphi$	I/I_0	
						По модели	Рассчитанное
1		-90					
2		-80					
3		-70					
4		-60					
5		-50					
6		-40					
7		-30					
8		-20					
9		-10					
10		0					
11		10					
12		20					
13		30					
14		40					
15		50					
16		60					
17		70					
18		80					
19		90					

5. Установить положение анализатора в соответствие с таблицей 112

Таблица 112 - Варианты для угла поворота поляризатора

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
угол φ_2	-53	-82	-49	-94	-37	-16	-75	-28	-61	0

6. Изменяя положение поляризатора в пределах от -90 до 90 записывать отношения интенсивностей естественного и прошедшего света
7. Заполнить таблицу, аналогичную таблице 111
8. Сделать выводы по работе

Задание на закрепление

Составить глоссарий по теме «Поляризация света» в объёме 15 терминов и решить задачу из сборника задач по физике Чертова, Воробьёва (в соответствии с номером в журнале):

Таблица 113 - Номера задач для самостоятельного решения

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
№ задачи	32.21	32.4	32.15	32.22	32.2	32.6	32.17	32.3	32.19	32.5

Контрольные вопросы и задания

1. Получите закон Малюса
2. При каком взаимном расположении поляризатора и анализатора свет через эту систему не проходит? Поясните это на примере механической аналогии
3. Как практически отличить плоскополяризованный свет от естественного?
4. Что называется оптической осью кристалла? Чем двуосные кристаллы отличаются от одноосных?
5. Что такое дихроизм? Поляроиды? Из чего их изготавливают?
6. Что называется пластинкой в полволны? В четверть волны?
7. Какие кристаллы называются изотропными? Анизотропными?
8. Что такое искусственное двойное лучепреломление? В чём заключается эффект Керра и Фарадея?
9. Какие вещества называются оптически активными? Приведите примеры таких веществ
10. Что такое поляриметрия? Где и для чего применяют этот метод?

1.18 Изучение фотоэффекта

Учебная цель работы

После исследований Юнга, Френеля и других учёных 19 века волновая теория света, казалось, полностью утвердилась в науке. Однако, были открыты явления, которые не описывались волновой теорией. Корпускулярные свойства излучения наиболее отчетливо обнаруживаются в явлении освобождения электронов из вещества под действием света — фотоэффекта. Позднее, в 1923 году, Артур Комптон открыл явления, названное его именем, которое тоже свидетельствовало о корпускулярных свойствах света. Таким

образом, опираясь на опытные данные, была принята концепция корпускулярно-волнового дуализма. Данная работа направлена на изучения явления, подтверждающего представление о свете как о потоке частиц – фотонах.

Содержание работы

В практической работе предлагается изучить законы внешнего фотоэффекта. На компьютерной модели проверить выполнение этих законов, построить семейство вольтамперных характеристик, определить работу выхода материала катода и постоянную Планка, рассчитать погрешности измерений.

Подготовка к работе

Для успешного выполнения и сдачи работы необходимо подготовить бланк отчёта по работе, подготовить ответы на контрольные вопросы, знать основы квантовых представлений, свойства фотонов, иметь представление о строении вещества.

Входной контроль

1. Что такое фотоэффект?
2. Какие виды фотоэффекта существуют?
3. Кем и когда было открыто явления фотоэффекта? Кто исследовал закономерности внешнего фотоэффекта?
4. Кем и каким образом было установлено, что при фотоэффекте происходит потеря электронов?
5. Что такое фототок? Фотоэлектроны?
6. Что такое красная граница фотоэффекта (порог)? Почему она так называется?
7. Что такое вольтамперная характеристика? Как она строится в данной работе?
8. Что называют работой выхода? Каков её физический смысл? В каких пределах лежит работа выхода металлов?
9. Начертите схему экспериментальной установки по наблюдению фотоэффекта
10. В чём заключается «смещение красной границы»? При каких условиях возникает и объясняется это явление?
11. Что такое запирающий (ускоряющий) потенциал? Как он влияет на фототок?

Порядок выполнения работы

Задание 1. Проверка первого закона фотоэффекта

1. Сделать описание модели (см. рисунок 29) согласно таблице 114

Таблица 43 - Описание компьютерной модели «Фотоэффект»

	Величины							
	Задаваемые				Вычисляемые			
Пределы изменения								
Единица измерения								

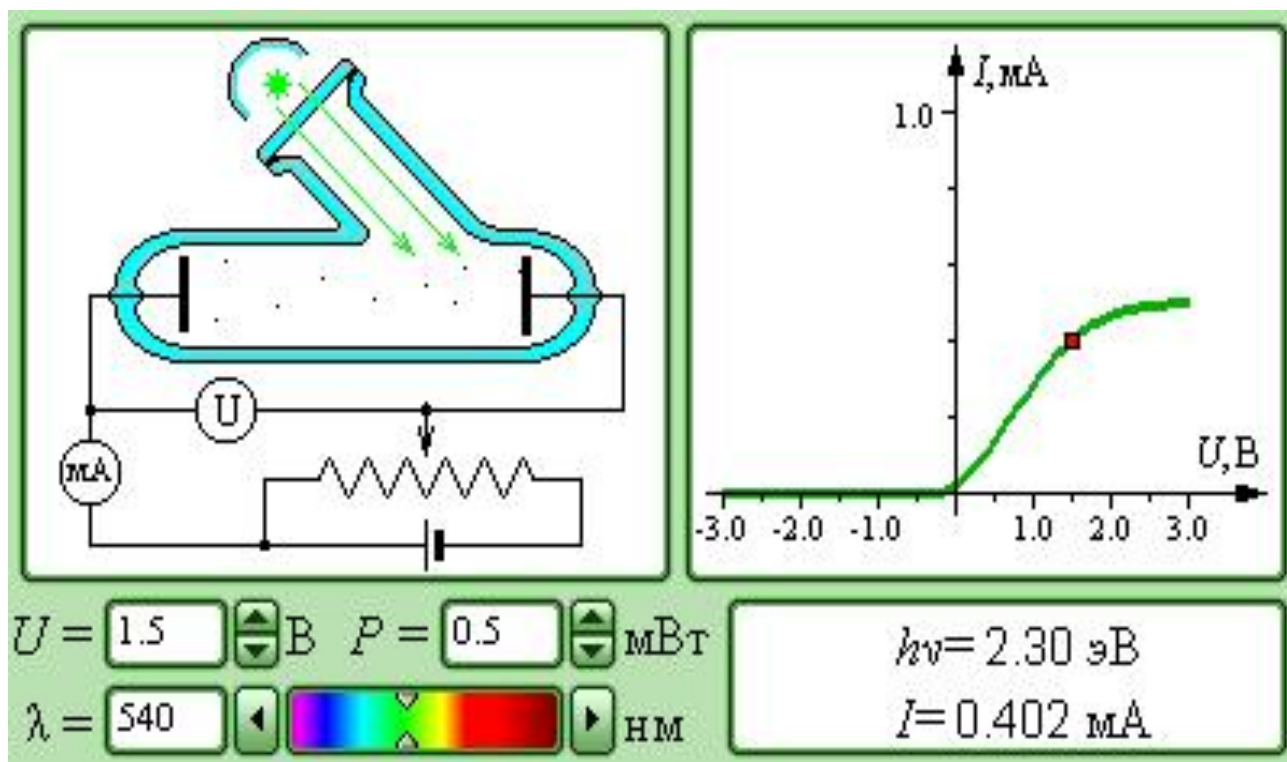


Рисунок 29 – Компьютерная модель «Фотоэффект»

2. Задать длину волны света в соответствии с таблицей 115

Таблица 115 – Варианты значений длины волны падающего света (в нм)

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Длина волны	380	406	432	458	484	510	536	562	590	620

3. Изменяя значение потенциала (от -3 до 3 В) записывать в таблицу 46 значения фототока для трёх значений интенсивности света, значения которых приведены в таблице 116

Таблица 116 – Варианты значений интенсивностей падающего света

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Интенсивность	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	0,1	0,2	0,3
	1,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9

Таблица 117 – Изучение внешнего фотоэффекта

№	Длина волны	Потенциал	Интенсивность 1	Сила тока1	Интенсивность 2	Сила тока2	Интенсивность 3	Сила тока3
1		-3						
2		-2,8						
3		-2,6						
4		-2,4						
5		-2,2						
6		-2						
7		-1,8						
8		-1,6						
9		-1,4						
10		-1,2						
11		-1						
12		-0,8						
13		-0,6						
14		-0,4						
15		-0,2						
16		0						
17		0,2						
18		0,4						
19		0,6						
20		0,8						
21		1						
22		1,2						
23		1,4						
24		1,6						
25		1,8						
26		2						
27		2,2						
28		2,4						
29		2,6						
30		2,8						
31		3						

4. Построить на одной координатной плоскости зависимость фототока от напряжения $I=I(U)$ – вольт-амперную характеристику - для трёх значений интенсивности света (получится семейство кривых)
5. Задайте длину волны в соответствии с таблицей 115
6. Установите максимальное значение интенсивности света
7. Изменяя значение потенциала от 3 до -3, найдите значение задерживающего потенциала для вашей длины волны
8. Прodelайте п.6 для минимальной интенсивности
9. Установите значение интенсивности в соответствии с первой строкой таблицы 117
10. Изменяя значение потенциала от 3 до -3, записывайте в таблицу 46 значения силы фототока при трёх различных длинах волн (в фиолетовой, голубой и жёлтой областях спектра)

Таблица 118 – Изучение внешнего фотоэффекта

№	Интенсивность	Потенциал	Длина волны1	Сила тока1	Длина волны2	Сила тока2	Длина волны3	Сила тока3
		В	нм	мА	нм	мА	нм	мА
1		-3						
2		-2,7						
3		-2,4						
4		-2,1						
7		-1,8						
8		-1,5						
9		-1,2						
10		-0,9						
11		-0,6						
12		-0,3						
13		0						
16		0,3						
17		0,6						
18		0,9						
19		1,2						
20		1,5						
21		1,8						
22		2,1						
23		2,4						
24		2,7						
25		3						

11. Постройте зависимость силы фототока от приложенного напряжения для трёх длин волн
12. Сделать выводы по заданию

Задание 2. Определение красной границы (второй закон) и постоянной Планка

1. Установите ускоряющее поле равное нулю и минимальную интенсивность падающего света
2. Изменяя значение длины волны света, определите максимальную длину волны, после которой фотоэффект прекращается. Об этом можно судить об отсутствии вырываемых электронов
3. Прodelайте п.3 с максимальной интенсивностью света
4. Установите максимальное значение ускоряющего поля и минимальную интенсивность падающего света
5. Определите красную границу
6. Прodelайте п.5 для максимальной интенсивности
7. В какой области спектра лежит красная граница фотоэффекта в данной модели?
8. Используя данные о красной границе (работе выхода), определите материал фотокатода, который «используется» в модели
9. Используя необходимые данные, найдите значение принятой в модели постоянной Планка
10. Сравните найденное значение с табличным и определите относительную погрешность
11. Сделайте вывод

Задание 3. Определение работы выхода и постоянной Планка (графический способ)

1. Установите значение интенсивности в соответствии со второй строкой таблицы 3
2. Задайте максимальное значение задерживающего потенциала
3. Установите значение длины волны 620 нм
4. Запишите значение фототока
5. Изменяя значение запирающего потенциала с шагом 0,1, изменяйте длину волны падающего света таким образом, чтобы значение фототока оставалось неизменным (п.4)
6. Постройте зависимость запирающего потенциала от частоты света
7. Определите по графику работу выхода
8. Найдите тангенс угла наклона прямой к оси частот и определите постоянную Планка
9. Найдите относительную погрешность для найденных работы выхода и постоянной Планка
10. Сделайте вывод

Задание на закрепление

Выполнить Задание на закрепление в соответствии с таблицей домашних заданий. Составить глоссарий по теме «Квантовые свойства излучения» в объёме 15 терминов и решить задачу из сборника задач по физике Чертова, Воробьёва (в соответствии с номером в журнале):

Таблица 119 - Номера задач для самостоятельного решения

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
№ задачи	25.3	35.7	35.9	35.6	35.2	35.8	35.10	35.4	35.1	35.5

Контрольные вопросы и задания

1. Сформулируйте законы внешнего фотоэффекта
2. Что такое фотон? Как определяется энергия, импульс и масса фотона?
3. Почему волновая теория не смогла объяснить законы фотоэффекта? Какое объяснение дала квантовая теория?
4. Запишите и объясните уравнение фотоэффекта (одно и многофотонного). Кто его получил?
5. Запишите уравнение Эйнштейна для фотоэффекта в неметаллах. Чем обусловлено дополнительное слагаемое?
6. Начертите и объясните семейство ВАХ фотоэффекта (при различных интенсивностях)
7. Что такое фототок насыщения? Как он объясняется?
8. Приведите примеры значений работ выхода и красных границ фотоэффекта для различных материалов.
9. Из какого материала «сделан» фотокатод в модели?
10. Каковы погрешности в определении постоянной Планка и работы выхода в данной работе?
11. Где применяют внешний фотоэффект? Внутренний? Вентильный?

1.19 Изучение ядерных реакций

Учебная цель работы

Не случайно 20 век называют атомным веком. Открытие явления радиоактивности Беккерелем в конце 19 века, открытие строения атома, изучение влияния радиоактивного излучения, исследования по делению ядра, создание мощного разрушительного оружия и мирных электростанций изменило облик человечества.

Теперь известно, что Солнце и другие звёзды черпают свою энергию за счёт термоядерного синтеза, а распад нескольких граммов урана дают энергию, сравнимую с тоннами сгоревшего угля. Когда то пугающие процессы обрели строгую физическую и математическую форму. Целью работы является изучение основных закономерностей поведения частиц при их взаимодействиях друг с другом.

Содержание работы

В практической работе предлагается, используя компьютерную модель, исследовать стабильность изотопов некоторых химических элементов, изучить типы ядерных превращений, познакомиться с видами термоядерного синтеза,

изучить протекающие реакции, а также познакомиться со строением и функционированием ядерного реактора и атомной электростанции.

Подготовка к работе

Для успешного выполнения и сдачи работы необходимо подготовить бланк отчёта по работе, подготовить ответы на контрольные вопросы, знать понятия ядерной реакции, виды реакций, дефекта масс, энергии связи, строение атома и атомного ядра, основные виды элементарных частиц.

Входной контроль

1. Каково строение атомного ядра в настоящее время? Кто предложил эту модель?
2. Что изучает ядерная физика? Что такое ядерная реакция? Термоядерная реакция?
3. Что такое нуклон? Нуклид?
4. Что такое массовое число? Зарядовое число? Как записывают ядра химических элементов в ядерной физике?
5. Что такое изотопы? Изотоны? Изобары?
6. Что такое энергия связи ядра? Удельная энергия связи?
7. Что такое энергия реакции? Какая реакция называется экзоэнергетической? Эндоэнергетической?
8. Какие законы сохранения выполняются при ядерных реакциях? Что такое барионный заряд?
9. Что такое эффективное сечение?
10. В чём измеряется эффективное сечение?
11. По каким признакам классифицируют ядерные реакции?

Порядок выполнения работы

Задание 1. Определение стабильных ядер изотопов атомов

1. Ознакомиться с моделью «Энергия связи ядер. Изотопы» по рисунку 30
2. Установите в модели число протонов в ядре Z в соответствие со своим вариантом (таблица 120). Необходимо проверить 10 ядер
3. Изменять число нейтронов N и отыскивать стабильные изотопы данного нуклида
4. Диапазон изменения числа нейтронов выбирается следующим образом. В левой части окна модели (см. рисунок 31) имеется диаграмма с числами протонов и нейтронов стабильных ядер. В соответствие со своим значением Z необходимо найти пересечение с полосой стабильности (в примере на рисунке взято ядро с зарядовым числом 50)

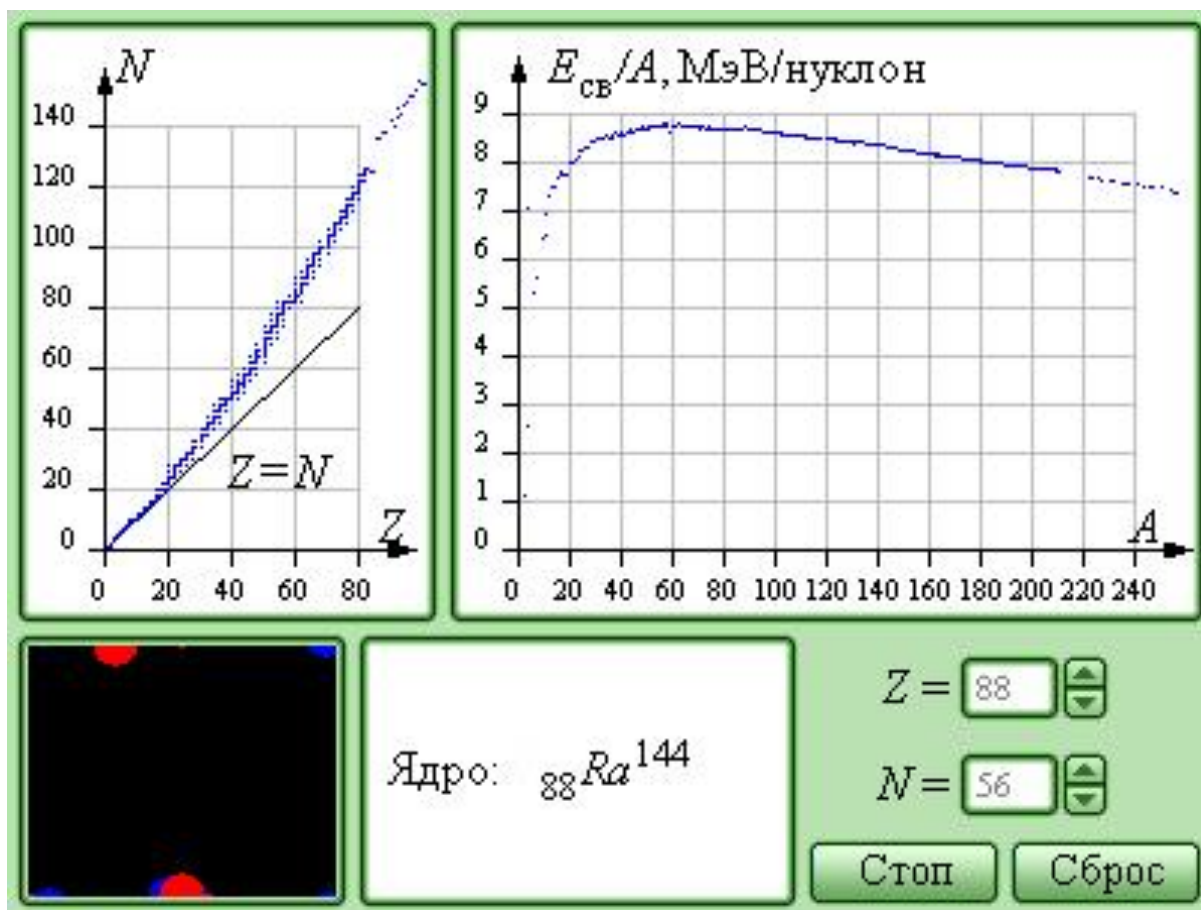


Рисунок 30 – Компьютерная модель «Энергия связи ядер. Изотопы»

5. В таблице 120 по вариантам даны зарядовые числа ядер, стабильные изотопы которых необходимо найти

Таблица 120 – Варианты значений зарядового числа ядра элемента

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Z ядра	4	21	16	70	49	42	10	44	65	14
	38	52	22	2	80	88	34	6	51	20
	57	8	69	23	71	33	73	35	19	76
	67	58	40	95	24	99	82	100	36	46
	15	78	59	53	32	1	63	13	75	37
	85	68	86	12	9	97	25	90	98	56
	47	39	94	31	96	81	18	26	45	66
	92	93	30	60	87	72	43	74	3	84
	77	29	5	79	17	54	50	64	83	27
	28	11	48	41	61	62	89	55	91	7

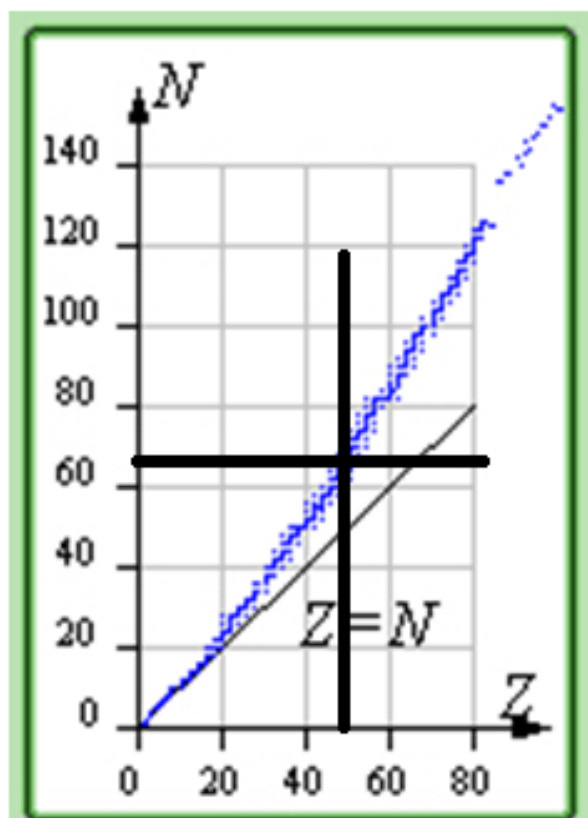


Рисунок 31 – Полоса стабильности элементов

Таблица 121 – Исследование стабильных изотопов элементов

№ п/п	Число протонов Z Название элемента	Число нейтронов N	Массовое число A	Стабильный изотоп
1	45 Родий	51	96	${}_{45}\text{Rh}^{96}$
		58	103	
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

6. Пересечение с полосой стабильности даст примерное число нейтронов (в примере – 65)
7. Отталкиваясь от этого примерного числа, изменяя число N в большую и меньшую сторону (приблизительно +/- 10-15) найти стабильные изотопы данных элементов
8. Для лёгких ядер диапазон изменения N может быть уже

9. Чтобы определить является ли изотоп стабильным необходимо, задав значения числа протонов и нейтронов, нажать кнопку «Старт». В левом нижнем углу модели ядро либо распадётся, либо останется неизменным
10. Для определения следующего ядра необходимо нажать кнопку «Сброс» и задать новые значения Z и N
11. Результаты необходимо занести в таблицу 121

Задание 2. Изучение ядерных реакций

1. Используя модель «Ядерные превращения» (см. рисунок 32), познакомиться с существующими типами ядерных превращений



Рисунок 32 – Компьютерная модель «Радиоактивные превращения»

2. Устанавливая в модели поочередно различные режимы ядерных превращений, познакомиться с ходом данных реакций
3. Записать изученные реакции в бланк отчёта
4. Используя найденные стабильные изотопы из задания 1, подвергнуть эти ядра альфа и бета распадам
5. Результаты реакций п.4 записать в бланк отчёта

Задание 3. Изучение термоядерных реакций

1. Познакомиться с моделью «Синтез гелия» (см. рисунок 33)

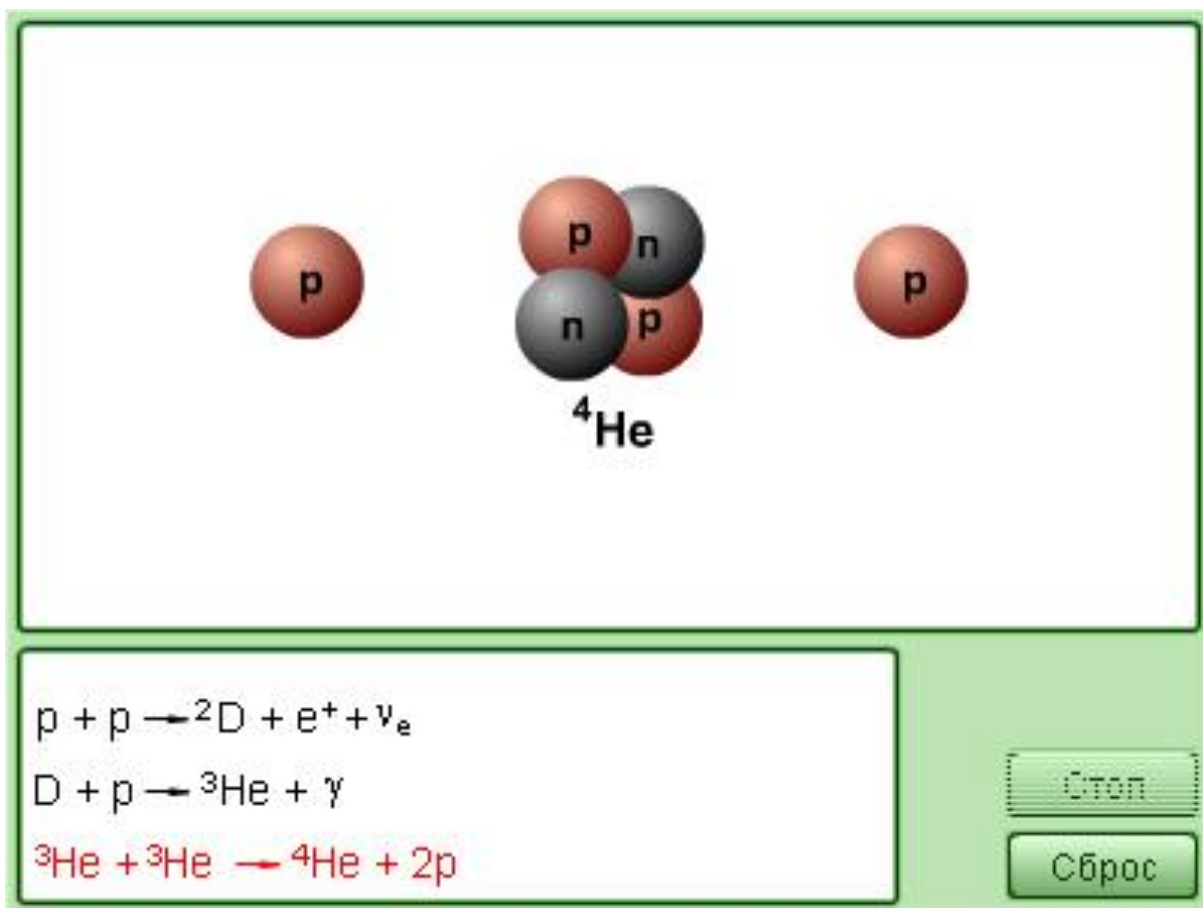


Рисунок 33 – Компьютерная модель «Синтез гелия»

2. Установить в модели режим водородного цикла
3. Записать в бланк отчёта термоядерные реакции водородного цикла при различных температурах, изменяя температурный режим
4. Установить режим углеродного цикла
5. Записать в бланк отчёта реакции углеродного цикла

Задание 4. Знакомство с устройством ядерного реактора

1. Используя модель «Ядерный реактор» изучить устройство ядерного реактора (см. рисунок 34)
2. Записать в бланк отчёта основные конструктивные особенности реактора
3. Нажав кнопку «Опустить» наблюдать за процессами, происходящими в реакторе
4. Записать в бланк отчёта условия процесса, при которых работает данная модель реактора (начальные и конечные)

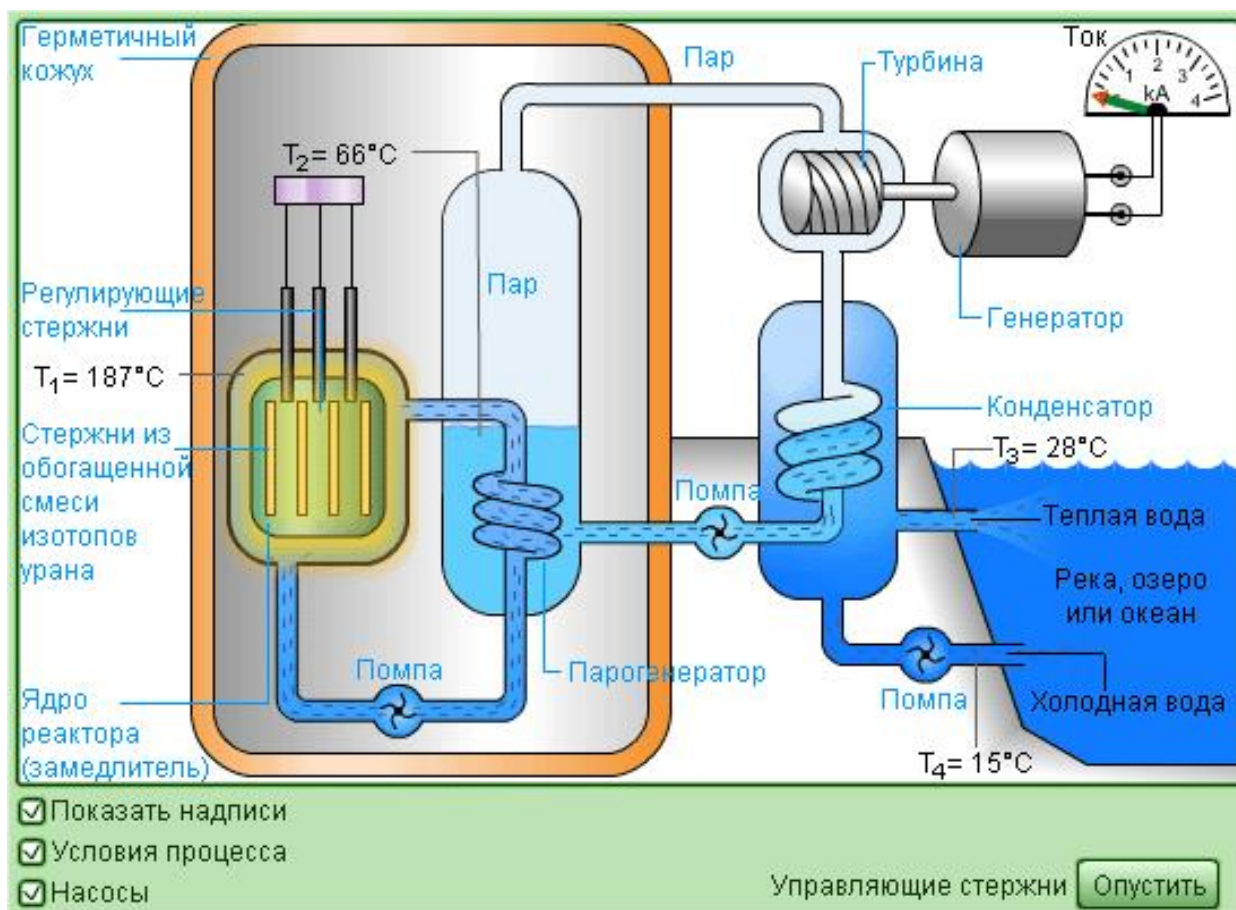


Рисунок 34 – Компьютерная модель «Ядерный реактор»

Домашнее задание

Выполнить Задание на закрепление в соответствии с таблицей домашних заданий. Составить глоссарий по теме «Ядерные реакции. Ядерный реактор» в объёме 15 терминов и решить задачу из сборника задач по физике Чертова, Воробьёва (в соответствии с номером в журнале):

Таблица 122 - Номера задач для самостоятельного решения

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
№ задачи	44.5	44.14	44.19	44.3	44.20	44.6	44.9	44.16	44.4	44.21

Контрольные вопросы и задания

1. Какие виды записей ядерных реакций существуют?
2. Какие виды ядерных превращений существуют? Приведите схемы (примеры)
3. Что такое протон-протонный цикл? Запишите реакции (при малых температурах)
4. Что такое углеродно-азотный цикл? Запишите реакции
5. Что такое реакции деления ядра? При каких условиях они происходят? Что такое нейтроны деления?

6. Что такое коэффициент размножения нейтронов? Какие значения он может принимать? Какие вещества применяют для замедления нейтронов?
7. Какая ядерная реакция называется цепной? Каковы условия осуществления цепной ядерной реакции? Начертите схему
8. Что такое критический размер и критическая масса? Какова критическая масса урана 235?
9. Какие типы ядерных реакторов существуют? В чём их сходства и отличия?
10. Опишите устройство ядерного реактора и процесс получения электрической энергии на АЭС. Чем он отличается от процесса получения электроэнергии на ТЭС и ГЭС?

2 Теоретическая часть

2.1 МЕХАНИКА

2.1.1 Кинематика движения тел в поле тяжести Земли

В общем случае **равнопеременным движением** называют такое движение, при котором вектор ускорения $\vec{a}$ остается неизменным по модулю и направлению. Если ускорение положительно, то движение будет равноускоренным, а если отрицательно – то равнозамедленным. Примером равнопеременного движения является движение камня, брошенного под некоторым углом к горизонту (без учета сопротивления воздуха): сначала камень летит равнозамедленно вверх, затем, достигая максимальной высоты, начинает падать вниз уже равноускоренно. В любой точке траектории ускорение камня равно **ускорению свободного падения $\vec{g}$** . Для кинематического описания движения камня систему координат удобно выбрать так, чтобы одна из осей, например ось ОУ, была направлена параллельно вектору ускорения. Тогда криволинейное движение камня можно представить как сумму двух движений – **прямолинейного равноускоренного движения** вдоль оси ОУ и **равномерного прямолинейного движения** в перпендикулярном направлении, т. е. вдоль оси ОХ (см. рисунок 35).

Таким образом, изучение равноускоренного движения сводится к изучению прямолинейного равноускоренного движения. В случае прямолинейного движения векторы скорости $\vec{v}$ и ускорения $\vec{a}$ направлены вдоль прямой движения. Поэтому скорость v и ускорение $\vec{a}$ можно рассматривать в проекциях на направление движения как алгебраические величины.

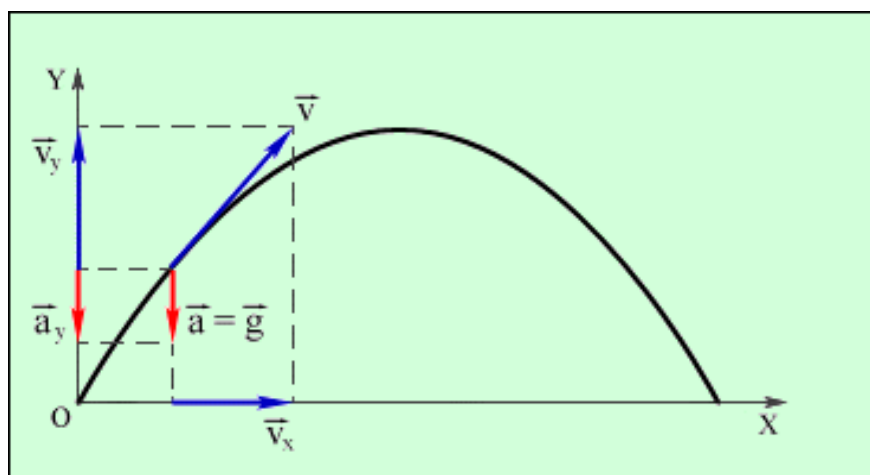


Рисунок 35 - Проекции векторов скорости $\vec{v}$ и ускорения $\vec{a}$ на координатные оси. $a_x = 0$, $a_y = -g$.

При равноускоренном прямолинейном движении скорость тела определяется формулой

$$v = v_0 + at. \quad (1)$$

В этой формуле v_0 – скорость тела при $t = 0$ (**начальная скорость**), $a = \text{const}$ – ускорение. На графике скорости $v(t)$ эта зависимость изображается прямой линией (см. рисунок 36).

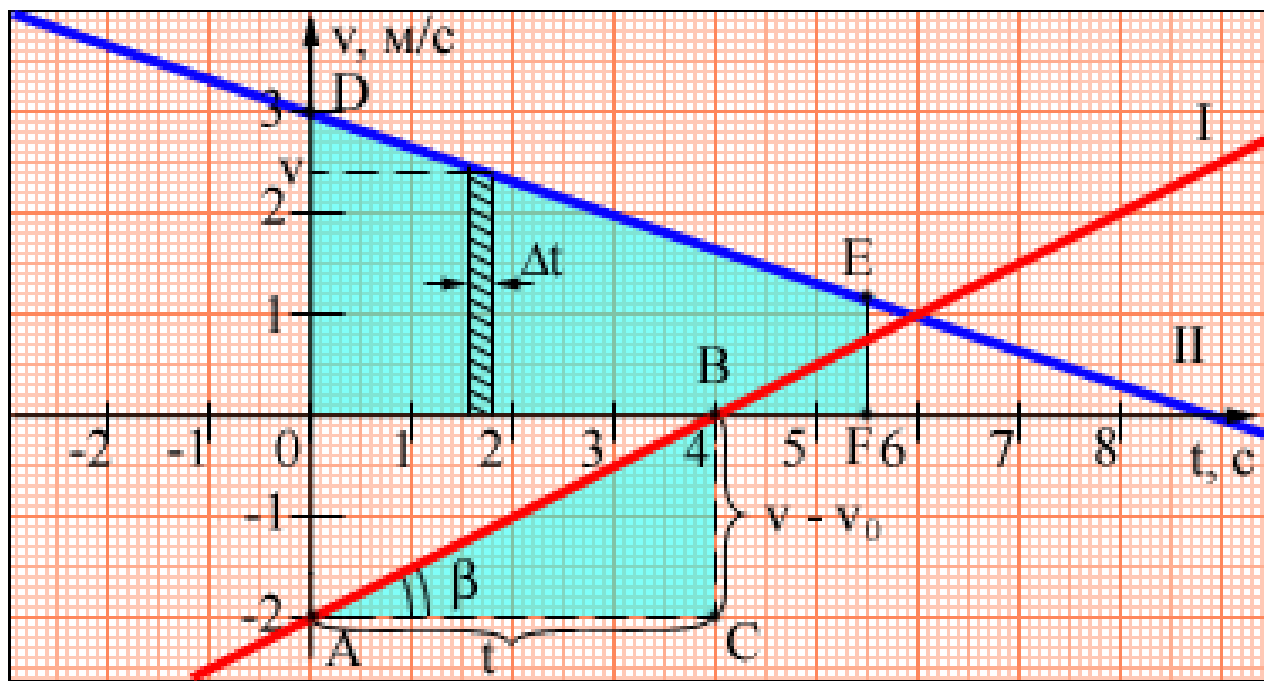


Рисунок 36 - Графики скорости равноускоренного движения

По наклону графика скорости может быть определено ускорение a тела. Соответствующие построения выполнены на рисунке 36 для графика I. Ускорение численно равно отношению сторон треугольника ABC:

$$a = \frac{v - v_0}{t} = \frac{|BC|}{|AC|}.$$

Чем больше угол β , который образует график скорости с осью времени, т. е. чем больше наклон графика (**крутизна**), тем больше ускорение тела.

Для графика I: $v_0 = -2$ м/с, $a = 1/2$ м/с².

Для графика II: $v_0 = 3$ м/с, $a = -1/3$ м/с².

График скорости позволяет также определить проекцию перемещения s тела за некоторое время t . Выделим на оси времени некоторый малый промежуток времени Δt . Если этот промежуток времени достаточно мал, то и изменение скорости за этот промежуток невелико, т. е. движение в течение этого промежутка времени можно считать равномерным с некоторой средней скоростью, которая равна мгновенной скорости v тела в середине промежутка Δt . Следовательно, перемещение Δs за время Δt будет равно $\Delta s = v \Delta t$. Это перемещение равно площади заштрихованной на рисунке 36 полоски. Разбив промежуток времени от 0 до некоторого момента t на малые промежутки Δt , можно получить, что перемещение s за заданное время t при равноускоренном

прямолинейном движении равно площади трапеции ODEF. Соответствующие построения выполнены на рисунке 36 для графика II. Время t принято равным 5,5 с.

Так как $v - v_0 = at$, окончательная формула для перемещения s тела при равномерно ускоренном движении на промежутке времени от 0 до t запишется в виде:

$$s = v_0 t + \frac{at^2}{2}. \quad (2)$$

Для нахождения координаты y тела в любой момент времени t нужно к начальной координате y_0 прибавить перемещение за время t :

$$y = y_0 + v_0 t + \frac{at^2}{2}. \quad (3)$$

Это выражение называют **законом равнопеременного движения**.

При анализе равноускоренного движения иногда возникает задача определения перемещения тела по заданным значениям начальной v_0 и конечной v скоростей и ускорения a . Эта задача может быть решена с помощью уравнений (1) и (2) путем исключения из них времени t . Результат записывается

$$s = \frac{v^2 - v_0^2}{2a}.$$

в виде $s = \frac{v^2 - v_0^2}{2a}$. Из этой формулы можно получить выражение для определения конечной скорости v тела, если известны начальная скорость v_0 ,

ускорение a и перемещение s : $v = \sqrt{v_0^2 + 2as}$.

Если начальная скорость v_0 равна нулю, эти формулы принимают вид

$$s = \frac{v^2}{2a}; \quad v = \sqrt{2as}.$$

Следует еще раз обратить внимание на то, что входящие в формулы равноускоренного прямолинейного движения величины v_0 , v , s , a , y_0 являются величинами алгебраическими. В зависимости от конкретного вида движения каждая из этих величин может принимать как положительные, так и отрицательные значения.

Свободным падением тел называют падение тел на Землю в отсутствие сопротивления воздуха (в пустоте). В конце XVI века знаменитый итальянский ученый Г. Галилей опытным путем установил с доступной для того времени точностью, что в отсутствие сопротивления воздуха все тела падают на Землю равноускоренно, и что в данной точке Земли **ускорение всех тел при падении одно и то же**. До этого в течение почти двух тысяч лет, начиная с Аристотеля, в

науке было принято считать, что тяжелые тела падают на Землю быстрее легких.

Ускорение, с которым падают на Землю тела, называется **ускорением свободного падения**. Вектор ускорения свободного падения обозначается символом $\vec{g}$ он направлен по вертикали вниз. В различных точках земного шара в зависимости от географической широты и высоты над уровнем моря числовое значение g оказывается неодинаковым, изменяясь примерно от $9,83 \text{ м/с}^2$ на полюсах до $9,78 \text{ м/с}^2$ на экваторе. На широте Москвы $g = 9,81523 \text{ м/с}^2$. Обычно, если в расчетах не требуется высокая точность, то принимают числовое значение g у поверхности Земли равным $9,8 \text{ м/с}^2$ или даже 10 м/с^2 .

Простым примером свободного падения является падение тела с некоторой высоты h без начальной скорости. Свободное падение является прямолинейным движением с постоянным ускорением. Если направить координатную ось OY вертикально вверх, совместив начало координат с поверхностью Земли, то для анализа свободного падения без начальной скорости можно использовать формулу (3), положив $v_0 = 0$, $y_0 = h$, $a = -g$. Обратим внимание на то, что если тело при падении оказалось в точке с координатой $y < h$, то перемещение s тела равно $s = y - h < 0$. Эта величина отрицательна, так как тело при падении перемещалось навстречу выбранному положительному направлению оси OY . В результате получим: $v = -gt$.

Скорость отрицательна, так как вектор скорости направлен вниз. При

этом координата положения тела будет определяться выражением: $y = h - \frac{gt^2}{2}$, а

время падения t_n тела на Землю найдется из условия $y = 0$: $t_n = \sqrt{\frac{2h}{g}}$. Скорость тела в любой точке составляет: $v = \sqrt{2g(h - y)}$. В частности, при $y = 0$ скорость v_n падения тела на землю равна $v_n = \sqrt{2gh}$.

Пользуясь этими формулами, можно вычислить время падения тела с данной высоты, скорость падения тела в любой момент после начала падения и в любой точке его траектории и т. д.

Аналогичным образом решается задача о движении тела, брошенного вертикально вверх с некоторой начальной скоростью v_0 . Если ось OY по-прежнему направлена вертикально вверх, а ее начало совмещено с точкой бросания, то в формулах равноускоренного прямолинейного движения следует положить: $y_0 = 0$, $v_0 > 0$, $a = -g$. Это дает: $v = v_0 - gt$.

Через время v_0 / g скорость тела v обращается в нуль, т. е. тело достигает высшей точки подъема. Зависимость координаты y от времени t выражается

формулой $y = v_0 t - \frac{gt^2}{2}$.

Тело возвращается на землю ($y = 0$) через время $2v_0 / g$, следовательно, время подъема и время падения одинаковы. Во время падения на землю

скорость тела равна $-v_0$, т. е. тело падает на землю с такой же по модулю скоростью, с какой оно было брошено вверх.

Максимальная высота подъема $h = y_{\max} = \frac{v_0^2}{2g}$.

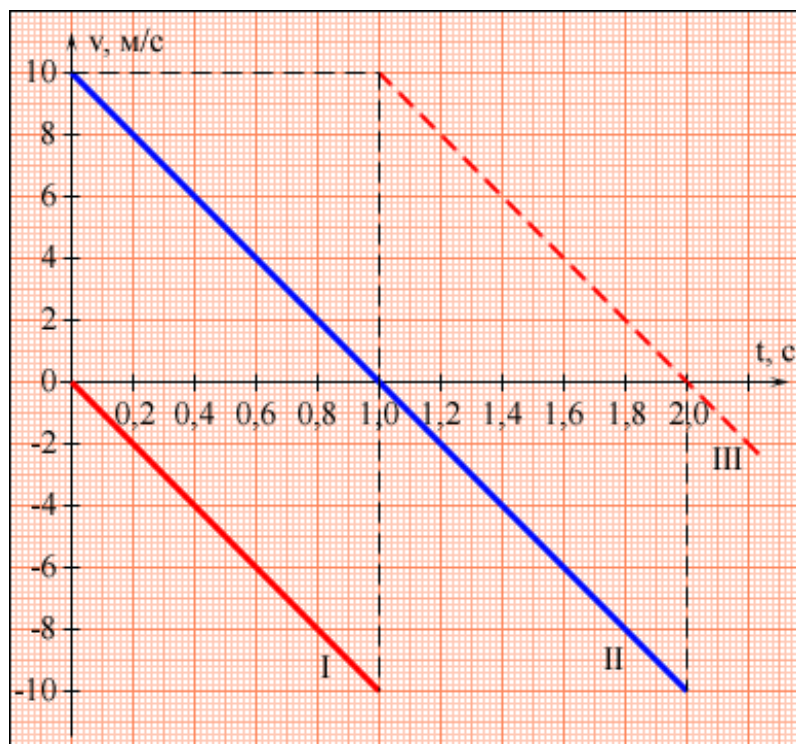


Рисунок 37 - Графики скоростей для различных режимов движения тела с ускорением $a = -g$.

На рисунке 37 представлены графики скоростей для трех случаев движения тела с ускорением $a = -g$. График I соответствует случаю свободного падения тела без начальной скорости с некоторой высотой h . Падение происходило в течение времени $t_n = 1$ с. Из формул для свободного падения легко получить: $h = 5$ м (все цифры в этих примерах округлены, ускорение свободного падения принято равным $g = 10$ м/с²).

График II – случай движения тела, брошенного вертикально вверх с начальной скоростью $v_0 = 10$ м/с. Максимальная высота подъема $h = 5$ м. Тело возвращается на землю через время 2 секунды.

График III – продолжение графика I. Свободно падающее тело при ударе о землю отскакивает (мячик), и его скорость за очень короткое время меняет знак на противоположный. Дальнейшее движение тела не отличается от случая II.

Задача о свободном падении тел тесно связана с задачей о движении тела, брошенного под некоторым углом к горизонту. Для кинематического описания движения тела удобно одну из осей системы координат направить вертикально вверх (ось OY), а другую (ось OX) – расположить горизонтально. Тогда

движение тела по криволинейной траектории можно представить как сумму двух движений, протекающих **независимо** друг от друга – движения с ускорением свободного падения вдоль оси ОУ и равномерного прямолинейного движения вдоль оси ОХ. На рисунке 38 изображен вектор начальной скорости $\vec{v}_0$ тела и его проекции на координатные оси.

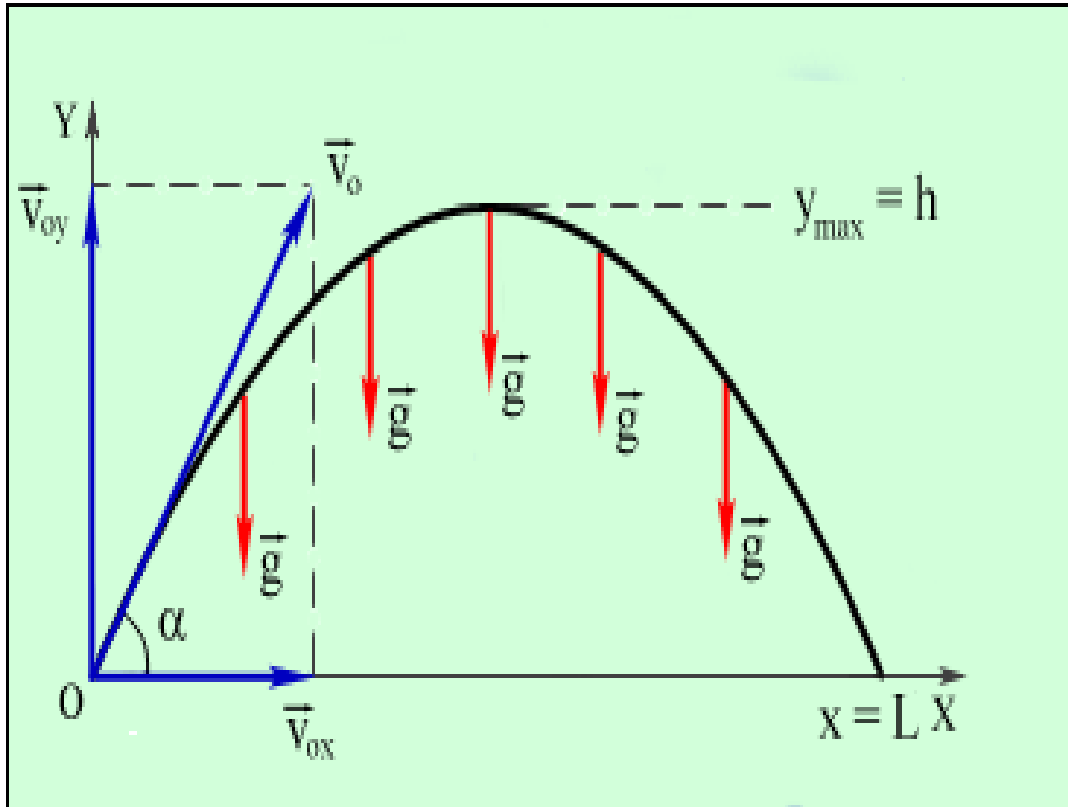


Рисунок 38 - Движение тела, брошенного под углом α к горизонту. Разложение вектора $\vec{v}_0$ начальной скорости тела по координатным осям

Таким образом, для движения вдоль оси ОХ имеем следующие условия: $x_0 = 0$, $v_{0x} = v_0 \cos \alpha$, $a_x = 0$, а для движения вдоль оси ОУ: $y_0 = 0$, $v_{0y} = v_0 \sin \alpha$, $a_y = -g$.

Приведем здесь некоторые формулы, описывающие движение тела, брошенного под углом α к горизонту.

$$\text{Время полета: } t = \frac{2v_0 \sin \alpha}{g}.$$

Дальность полета: $L = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g}$; $L = L_{\max} = \frac{v_0^2}{g}$ при $\alpha = 45^\circ$. Из этой формулы видно, что максимальная дальность полёта будет в том случае, когда синус достигает своего максимального значения, равного единице. Это возможно, когда угол равен 90 градусов, т.е. угол бросания должен быть

90/2=45 градусов. Максимальная высота подъема определится выражением:

$$h = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}.$$

Движение тела, брошенного под углом к горизонту, происходит по параболической траектории. В реальных условиях такое движение может быть в значительной степени искажено из-за сопротивления воздуха, которое может во много раз уменьшить дальность полета тела.

2.1.2 Трение

В механике обычно имеют дело с силами всемирного тяготения, упругими силами и силами трения. Иногда в механику включаются также задачи на движение электрически заряженных частиц в электрических и магнитных полях. Тогда к указанным силам добавляются еще электромагнитные силы, т. е. силы, которым подвержены заряженные частицы со стороны таких полей. Рассмотрим силы, трения. Заметим при этом, что механика не занимается изучением физической природы действующих сил - эти вопросы рассматриваются в других разделах физики.

Упругие силы, силы всемирного тяготения, а также силы притяжения и отталкивания электрически заряженных тел зависят только от конфигурации тел, т. е. от их взаимного расположения, но не от их скоростей. Силы трения, помимо конфигурации, зависят еще от относительных скоростей тел, между которыми они действуют.

Силы трения могут действовать между соприкасающимися телами или их частями как при их относительном движении, так и при их относительном покое. Трение называется **внешним**, если оно действует между различными соприкасающимися телами, не образующими единого тела (например, трение между бруском и наклонной плоскостью, на которой он лежит или с которой он соскальзывает). Если же трение проявляется между различными частями одного и того же тела, например между различными слоями жидкости или газа, скорости которых непрерывно меняются от слоя к слою, то трение называется **внутренним**. Впрочем, деление трения на внутреннее и внешнее носит условный характер. Если соприкасающиеся тела объединить в одну механическую систему, то трение, которое ранее рассматривалось как внешнее, становится внутренним. Сила трения, испытываемая твердым телом при движении в жидкости (или газе), есть сила внутреннего трения в жидкости, а не внешнего трения между жидкостью и твердым телом. Действительно, опыт показывает, что слои жидкости или газа, непосредственно примыкающие к поверхности тела, прилипают к ней и движутся вместе с телом, а трение возникает в окружающей среде между различными слоями ее, соприкасающимися друг с другом.

Трение между поверхностями двух соприкасающихся твердых тел при отсутствии между ними жидкой или газообразной прослойки (смазки)

называется **сухим**. Применительно к этому случаю, когда соприкасающиеся тела движутся друг относительно друга, различают трение скольжения и трение качения. Трение между поверхностью твердого тела и окружающей его жидкой или газообразной средой, в которой оно движется, а также трение между различными слоями такой среды, называется **жидким** или **вязким**.

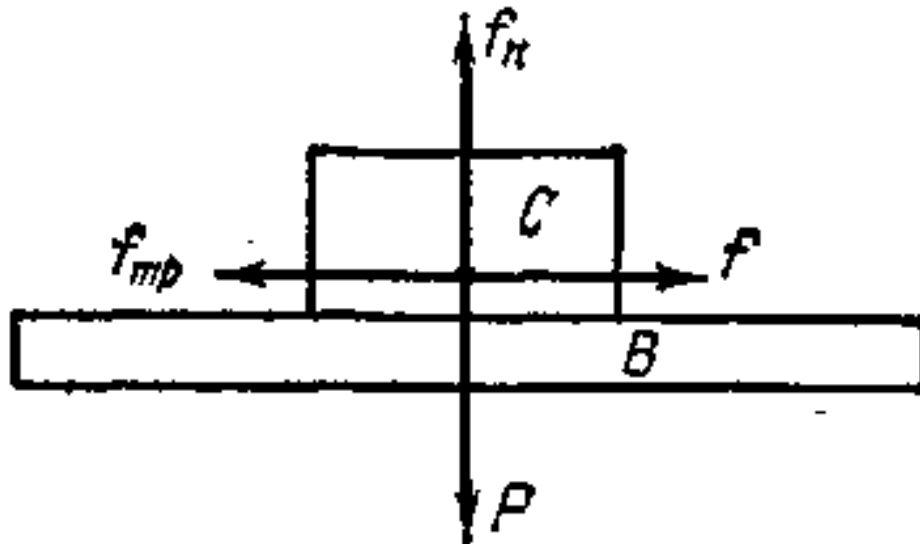


Рисунок 39 - Силы, действующие на тело, находящееся на горизонтальной поверхности

Рассмотрим сначала законы сухого трения. Такое трение возникает не только при скольжении одного тела по поверхности другого, но и при всякой попытке вызвать такое скольжение. В последнем случае трение называется **трением покоя** или **трением сцепления**. Наличие трения покоя — характерная особенность сухого трения. В более общем смысле, безотносительно к тому, между какими телами возникает трение, оно называется сухим, если силы трения не исчезают при обращении в нуль относительных скоростей соприкасающихся тел. В противоположном случае трение называется жидким. Положим тяжелый брусок на поверхность горизонтального стола (см. рисунок 39). В состоянии покоя вес бруска P уравновешен силой нормального давления (нормальной реакции опоры) f_n , с которой на брусок действует стол ($P = f_n$). Приложим затем к бруску горизонтальную силу f , лежащую в вертикальной плоскости, проходящей через его центр масс, как можно ближе к поверхности стола, чтобы предотвратить опрокидывание бруска, когда он придет в движение. Опыт показывает, что если сила f не превосходит некоторой определенной величины f_0 ($f < f_0$), то брусок не приходит в движение. Отсюда следует сделать вывод, что на брусок со стороны стола действует равная и противоположно направленная сила $f_{тр}$, уравнивающая силу f . Это и есть сила трения, а именно трения покоя. Такая же сила трения, но в противоположном направлении, действует на поверхность стола со стороны бруска. Сила трения покоя автоматически принимает значения, равные внешней силе f . Максимальное значение силы трения покоя равно f_0 .

Допустим теперь, что брусок скользит по поверхности стола со скоростью v . При равномерном движении действующая сила f по-прежнему уравнивается силой трения $f_{\text{тр}}$. Если равновесия нет, то движение будет ускоренным. В обоих случаях величина силы трения $f_{\text{тр}}$, вообще говоря, зависит от скорости v . Характер этой зависимости графически изображен на схематическом рисунке 40.

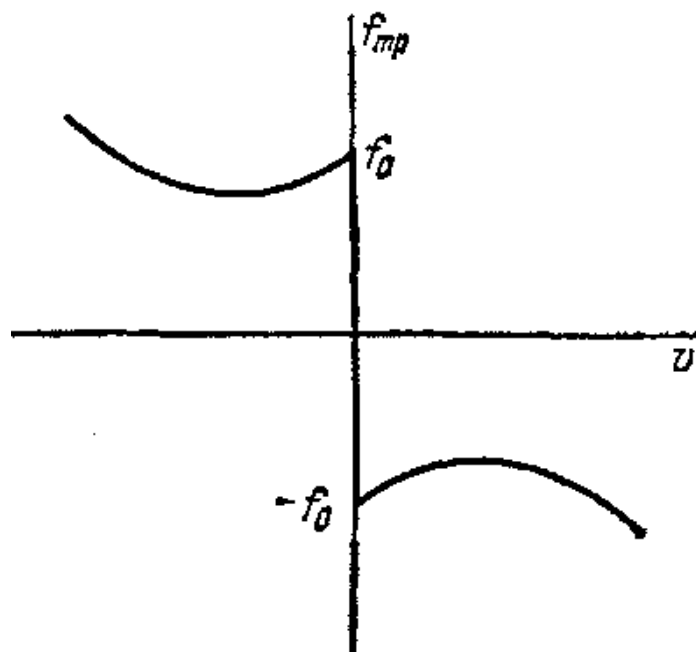


Рисунок 40 - К зависимости силы трения от скорости движения тела

Сила трения, приложенная к поверхности бруска, всегда действует против направления движения последнего. На графике это отражено тем, что знаки величин $f_{\text{тр}}$ и v всегда противоположны. При $v=0$ график вырождается в отрезок вертикальной прямой. Этому соответствует тот факт, что сила трения покоя может принимать любое значение от $-f_0$ до $+f_0$. При увеличении абсолютной величины скорости абсолютная величина силы трения сначала убывает, проходит через минимум, а затем начинает возрастать. Вся кривая симметрична относительно начала координат [$f(+v) = -f(-v)$]. Как экспериментально установил Кулон (1736—1806), величина силы трения $f_{\text{тр}}$ не зависит от величины площади поверхности, вдоль которой тела соприкасаются, и пропорциональна силе нормального давления f_n , с которой одно тело действует на другое. Поэтому можно написать

$$f_{\text{тр}} = \mu f_n. \quad (4)$$

Постоянная μ называется **коэффициентом трения** и зависит от природы и состояния трущихся поверхностей. Если тело действительно скользит по поверхности другого тела, то μ называют **коэффициентом трения скольжения**. Если же тела покоятся друг относительно друга, то его называют

коэффициентом трения покоя. В последнем случае предполагается, что в формуле $f_{\text{тр}}$ равно f_0 , т. е. максимальному значению, которое может принимать сила трения покоя. В соответствии с рисунке 40 коэффициент трения, вообще говоря, зависит от величины скорости v . Впрочем, как также установил Кулон, эта зависимость, как правило, выражена слабо, так что, когда не требуется большая точность, коэффициент μ можно считать независимым от скорости. Тогда кривая рисунке 40 вырождается в кривую рисунке 41. Сила трения и в этом идеализированном случае зависит от v , поскольку при переходе скорости через нуль она меняет знак, а при $v=0$ становится неопределенной.

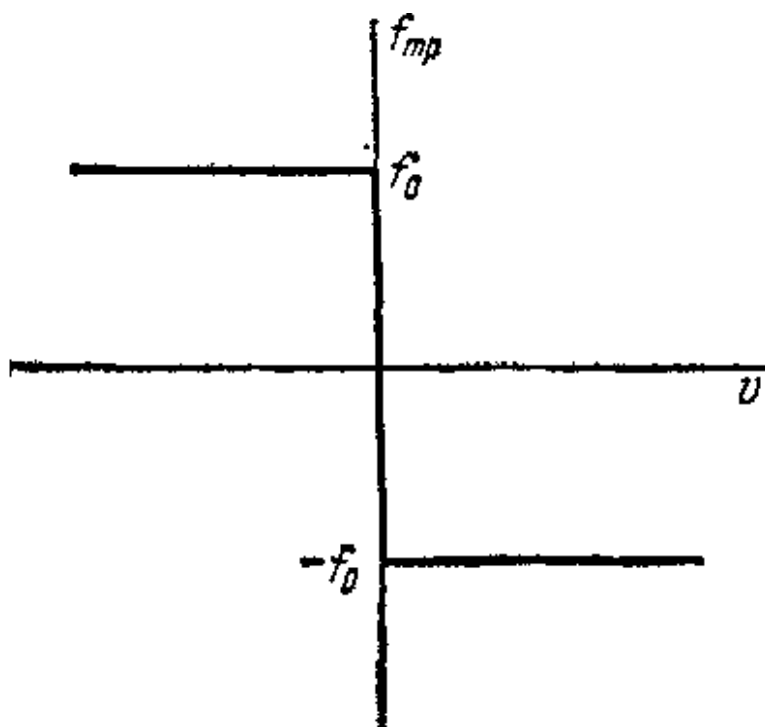


Рисунок 41 - К зависимости силы трения от скорости движения тела

Независимость силы трения покоя от площади соприкосновения тел можно продемонстрировать с помощью следующего опыта. Брусок (например, кирпич), имеющий форму прямоугольного параллелепипеда, кладется различными гранями на наклонную плоскость. Увеличивая угол наклона наклонной плоскости, на опыте убеждаемся, что скольжение начинается при одном и том же угле, независимо от того, какой гранью брусок был положен на наклонную плоскость.

При наличии сухого трения тело может находиться в состоянии покоя, даже если на него подействовать какой-либо силой.

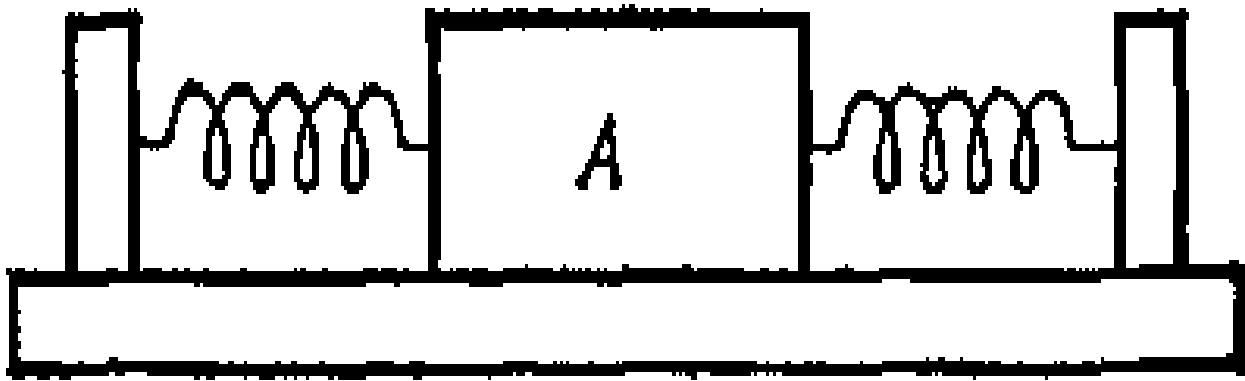


Рисунок 42 - Явление застоя

Если приложенная сила f не превосходит максимального значения f_0 силы трения покоя, то тело не придет в движение. С этой особенностью сухого трения связано так называемое **явление застоя**. Допустим, например, что тело A , лежащее на поверхности горизонтального стола, находится в равновесии, когда обе прикрепленные к нему пружины не растянуты или растянуты одинаково (см. рисунок 42). В этом положении сила, действующая на тело A , равна нулю. Сместим тело A из положения равновесия в ту или другую сторону. Если сила f , действующая со стороны растянутых пружин, не превосходит f_0 , то тело A и в новом положении останется в равновесии. На поверхности стола не существует определенного положения равновесия тела. Напротив, существует область, при смещении в пределах которой тело остается в равновесии. Эта область называется **областью застоя**. Сухое трение, действующее, например, в подшипниках измерительных приборов со стрелками, ограничивает чувствительность таких приборов. Наличие же области застоя делает неопределенным положение равновесия, в котором устанавливается стрелка при измерениях, т. е. ограничивает точность измерения.

Во многих случаях силы трения оказываются полезными. Так, автомобиль приводится в движение силами трения, действующими между шинами колес и полотном дороги. Силы трения приводят в движение поезда. Силы трения, возникающие между приводным ремнем и шкивами, осуществляют передачу движения от одного маховика к другому. Подобных примеров можно привести неограниченно много. Но сплошь и рядом силы трения являются вредными. Таковы, например, силы трения, возникающие между осью и втулкой, а также между другими деталями машины. Они приводят к преждевременному износу машин, и с ними приходится бороться. Для этой цели применяется **смазка**. Однако более радикальным способом уменьшения сил трения является замена трения скольжения **трением качения** (шарикоподшипники). Под трением качения понимают трение возникающее, например, между шарообразным или цилиндрическим телом, катящимся без скольжения по плоской или изогнутой поверхности. Трение качения формально

подчиняется тем же законам, что и трение скольжения. Однако коэффициент трения при качении значительно меньше, чем при скольжении. Наиболее радикальным способом уменьшения сил трения, который за последнее время начинает получать все большее и большее распространение, является создание «воздушной подушки» между соприкасающимися поверхностями.

Как уже говорилось выше, в отличие от сил сухого трения, силы жидкого или вязкого трения обращаются в нуль вместе с относительными скоростями между соприкасающимися слоями среды. Рассмотрим только силы жидкого трения, возникающие при движении твердого тела в жидкой или газообразной среде. Помимо сил, обусловленных собственно внутренним трением, на поверхность движущегося тела со стороны среды действуют также силы нормального давления. Результирующая этих нормальных давлений имеет составляющую, направленную против движения тела. Такая составляющая называется **силой сопротивления среды**. При больших скоростях она во много раз превосходит силы сопротивления, обусловленные собственно вязким трением. При рассмотрении движения тела в вязкой среде эти две силы целесообразно объединить вместе. Такую суммарную силу, направленную против скорости движущегося тела, условно будем называть также **силой трения** и обозначать символом $\mathbf{f}_{\text{тр}}$.

При малых скоростях сила $\mathbf{f}_{\text{тр}}$ пропорциональна первой степени скорости тела:

$$\vec{f}_{\text{тр}} = -k_1 \vec{v} \quad (5)$$

При возрастании скорости зависимость становится более сложной, а затем сила трения начинает возрастать приблизительно пропорционально квадрату скорости:

$$\vec{f}_{\text{тр}} = -k_2 v^2 \frac{\vec{v}}{v} = -k_2 v \vec{v} \quad (6)$$

«Коэффициенты трения» $\mathbf{k}_1$ и $\mathbf{k}_2$ также область скоростей, в которой осуществляется переход от линейного закона (5) к квадратичному (6), в сильной степени зависят от формы и размеров тела, направления его движения, состояния поверхности тела и от свойств окружающей среды. Искусственно увеличивая поверхность тела и придавая ей надлежащую форму, можно сильно увеличить значения коэффициентов $\mathbf{k}_1$ и $\mathbf{k}_2$.

2.1.3 Закон сохранения импульса

Интересные превращения кинетической энергии в потенциальную и обратно наблюдаются при **абсолютно упругом ударе**. Так называется столкновение тел, в результате которого их внутренние энергии не меняются. В чистом виде такой случай при столкновении макроскопических тел не

встречается. Но к нему можно подойти довольно близко. Это имеет место, например, при столкновениях бильярдных шаров из слоновой кости или подходящей пластмассы. При столкновениях атомных, ядерных или элементарных частиц может реализоваться и случай абсолютно упругого удара в чистом виде. Такая возможность связана с квантовыми законами. Внутренние состояния и соответствующие им значения внутренней энергии атомных частиц дискретны (квантованы). Частицы при столкновении могут разлететься без изменения внутренних состояний. Тогда столкновение и будет абсолютно упругим. Так будет всегда, когда кинетической энергии сталкивающихся частиц недостаточно, чтобы перевести хотя бы одну из них из нормального в ближайшее возбужденное состояние, характеризующееся большим значением внутренней энергии. При больших энергиях столкновение может сопровождаться возбуждением одной или обеих частиц с увеличением их внутренних энергий. Наконец, может быть и такой случай, когда сталкиваются возбужденные частицы и в результате столкновения их внутренние энергии уменьшаются. Во всех таких случаях говорят о **неупругих ударах**.

Рассмотрим сначала центральные удары абсолютно упругих шаров. В этом случае скорости шаров до удара v_1 и v_2 направлены вдоль прямой, соединяющей их центры. Эта прямая называется **линией центров**. При столкновении кинетическая энергия шаров $\frac{1}{2} (m_1 + m_2) V^2$, связанная с движением их центра масс, измениться не может, так как не может измениться скорость самого центра масс. Может претерпевать превращения только кинетическая энергия $\frac{1}{2}\mu (v_1 - v_2)^2$ относительного движения шаров. В случае абсолютно упругого удара шары при столкновении сплющиваются, и кинетическая энергия частично переходит в потенциальную энергию упругих деформаций. В некоторый момент вся кинетическая энергия относительного движения $\frac{1}{2}\mu (v_1 - v_2)^2$ переходит в потенциальную энергию упруго деформированных шаров. В этот момент шары аналогичны сжатым пружинам, стремящимся перейти в недеформированное состояние (см. рисунок 43).

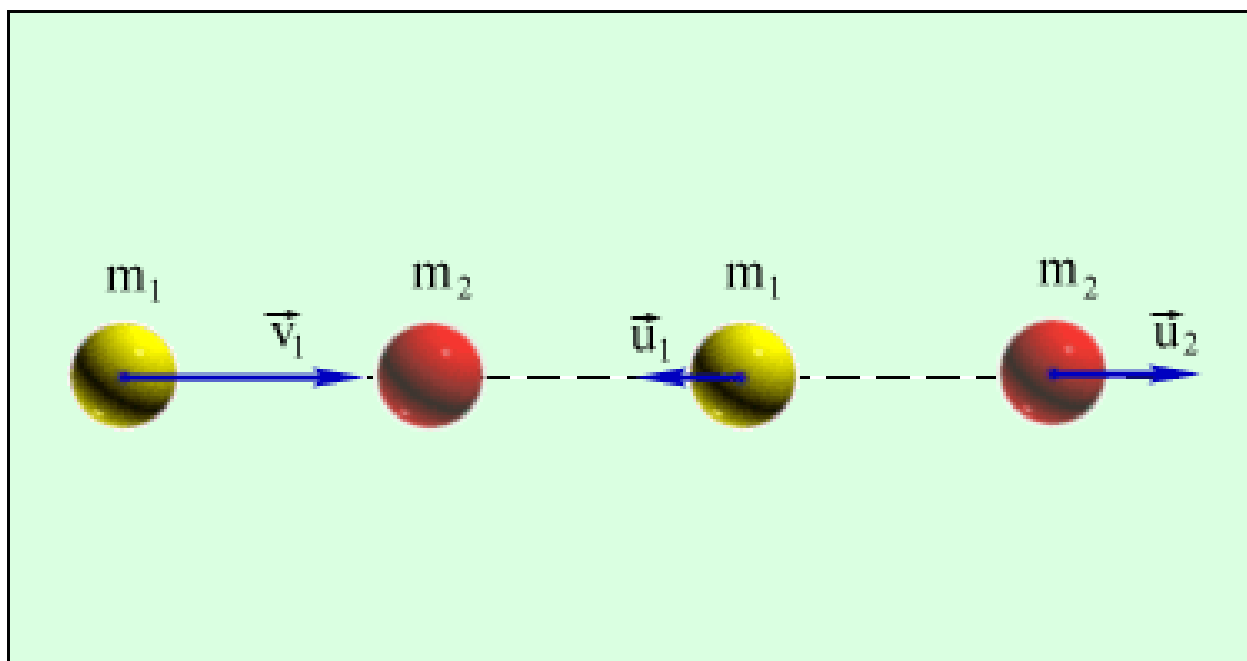


Рисунок 43 – Направления векторов скорости до и после столкновения шаров (второе тело до соударения покоилось)

Ввиду этого начинается обратный процесс перехода энергии упругих деформаций в кинетическую энергию поступательного движения шаров. Когда он заканчивается, шары разлетаются в разные стороны и вновь оказываются не деформированными. Таким образом, кинетическая энергия поступательного движения шаров снова принимает исходное значение, каким оно было до удара. Для реальных тел этот процесс осложняется возникновением упругих возмущений, распространяющихся в шарах со скоростью звука, излучением звуковых волн, а также внутренним трением и остаточными деформациями. После столкновения часть энергии уносится в виде энергии таких упругих возмущений, внутренних движений и звуковых волн, излученных в окружающую среду. Эта часть энергии в конце концов переходит в тепловую (внутреннюю) энергию. Она может быть очень малой и в предельном случае идеально упругих шаров обращается в нуль.

Скорости шаров после столкновения v_1' и v_2' легко найти из законов сохранения импульса и энергии:

$$\begin{aligned} m_1 v_1' + m_2 v_2' &= m_1 v_1 + m_2 v_2 \\ 1/2 m_1 v_1'^2 + 1/2 m_2 v_2'^2 &= 1/2 m_1 v_1^2 + 1/2 m_2 v_2^2 \end{aligned} \quad (7)$$

Так как одно из этих уравнений — квадратное, а другое — линейное, то система должна иметь два решения относительно неизвестных v_1' и v_2' . Одно из этих решений можно указать сразу, а именно $v_1' = v_1, v_2' = v_2$. Но это решение не удовлетворяет условию задачи. Ему соответствует случай, когда скорости шаров изменились, т.е. шары не претерпели столкновения. Существования такого решения неизбежно. Действительно, законы сохранения импульса и энергии можно написать для двух любых состояний системы, разделённых

каким-то промежутком времени. Но в самих законах сохранения ещё не заложено условие, что столкновение произошло. Это условие должно быть указано дополнительно. Если столкновение не произошло, то скорости шаров не могли измениться, и получаем решение $v'_1 = v_1, v'_2 = v_2$ (полученное выше). Чтобы получить новые решения, относящиеся к столкновению, надо потребовать, чтобы скорости шаров изменились, т.е. чтобы они не были равны. Перепишем уравнения (7) в виде

$$\begin{aligned} m_1 (v'_1 - v_1) &= m_2 (v_2 - v'_2) \\ m_1 (v_1'^2 - v_1^2) &= m_2 (v_2^2 - v_2'^2) \end{aligned} \quad (8)$$

Так как $v'_1 - v_1$ и $v'_2 - v_2$ не равны нулю, то уравнения можно поделить почленно. Это дает

$$v'_1 + v_1 = v'_2 + v_2 \quad (9)$$

В результате задача свелась к решению системы двух линейных уравнений. Решая их, найдём единственное решение

$$v'_1 = -v_1 + 2 \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}, \quad v'_2 = -v_2 + 2 \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}, \quad (10)$$

удовлетворяющее решению задачи.

Полезно привести другой способ решения той же задачи. Он сокращает вычисления и лучше выявляет структуру окончательных формул. Рассмотрим процесс удара сначала в системе центра масс, т. е. в такой системе отсчета, в которой центр масс неподвижен (см. рисунок 44). Относительно неподвижной системы отчёта (её называют лабораторной) центр масс движется со скоростью

$$V = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2}. \quad (11)$$

Скорости в системе центра масс будем обозначать прежними буквами, но с индексом 0. Полный импульс в системе центра масс равен нулю, и законы сохранения запишутся в виде

$$\begin{aligned} m_1 v_{10}' + m_2 v_{20}' &= m_1 v_{10} + m_2 v_{20} = 0 \\ 1/2 m_1 v_{10}'^2 + 1/2 m_2 v_{20}'^2 &= 1/2 m_1 v_{10}^2 + 1/2 m_2 v_{20}^2 \end{aligned} \quad (12)$$

Эта система уравнений имеет два решения, которые могут быть указаны без вычислений. Первое решение

$$v_{10}' = v_{10}, \quad v_{20}' = v_{20} \quad (13)$$

не удовлетворяет условиям задачи. Годится только второе решение, а именно

$$v_{10}' = -v_{10}, v_{20}' = -v_{20} \quad (14)$$

Мы видим, что в системе центра масс столкновение приводит просто к изменению знака каждой из скоростей.

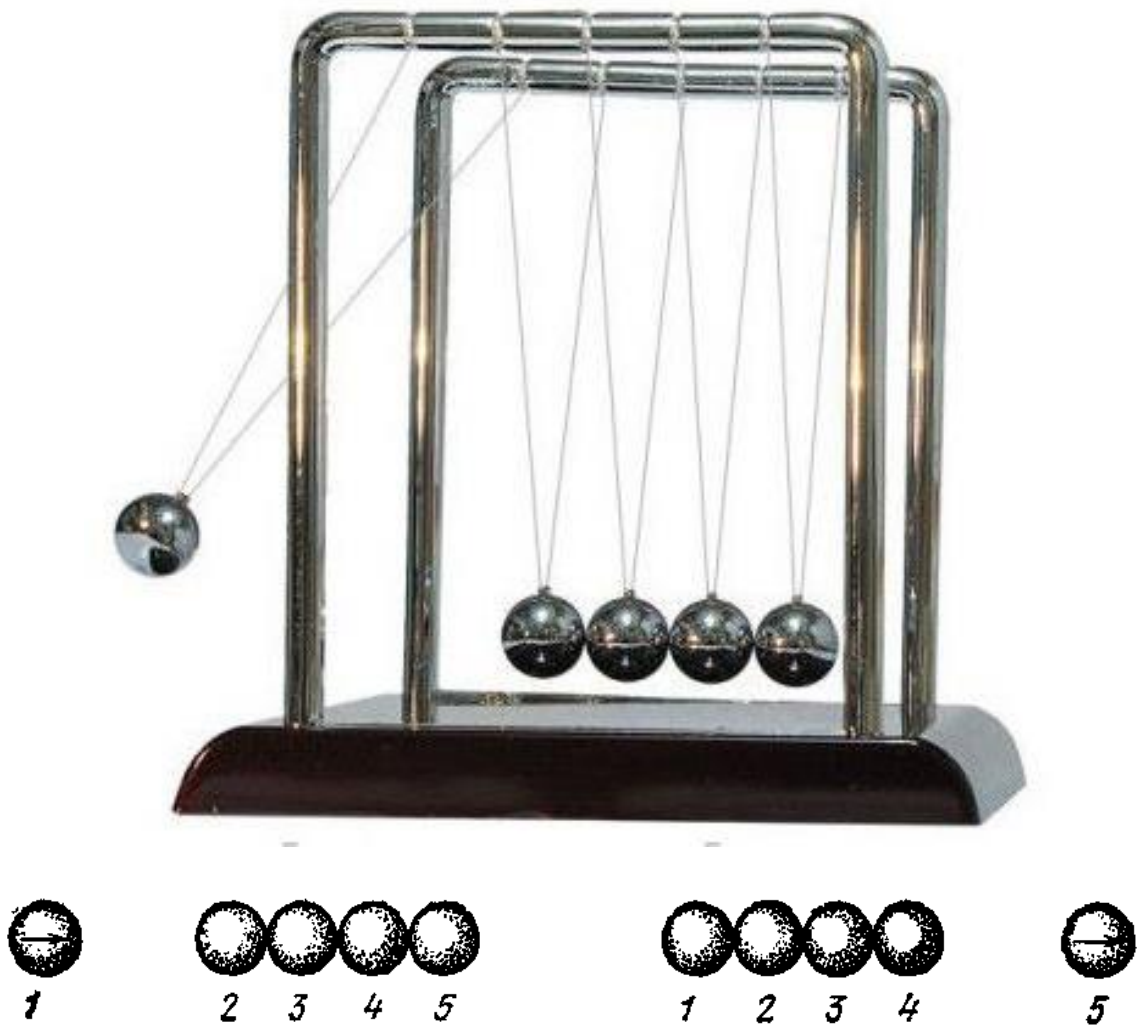


Рисунок 44 – К обмену энергией абсолютно упругими шарами одинаковой массы

Перейдем теперь к лабораторной системе отсчета. Т.к. $v_{10} = v_1 - V$, $v_{01}' = v_1' - V$ и т. д. Поэтому

$$(v_1' - V) = -(v_1 - V), (v_2' - V) = -(v_2 - V), \quad (15)$$

откуда

$$v_1' = -v_1 + 2V, v_2' = -v_2 + 2V \quad (16)$$

Подставив сюда значение

$$v_1' = -v_1 + 2V, \quad v_2' = -v_2 + 2V. \quad (17)$$

для V из (10), придем к прежним формулам (11).

Допустим, что второй шар вначале был неподвижным ($v_2 = 0$). Тогда

$$v_1' = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} v_1, \quad v_2' = \frac{2m_1}{m_1 + m_2} v_1. \quad (18)$$

Если $m_1 > m_2$, то первый шар будет двигаться в первоначальном направлении. При $m_1 < m_2$ он **отскочит** в противоположном направлении. При $m_1 = m_2$ первый шар остановится, а второй пойдет вперед со скоростью первого. Вообще, при $m_1 = m_2$ из формул (2) получаем

$$v_1' = v_2, \quad v_2' = v_1, \quad (19)$$

т. е. при столкновении двух одинаковых абсолютно упругих шаров они просто обмениваются скоростями.

Рассмотрим ряд соприкасающихся одинаковых абсолютно упругих шаров, центры которых расположены вдоль одной и той же прямой линии (см. рисунок 45). В соответствующем демонстрационном опыте шары подвешиваются на нитях, а не располагаются на поверхности стола, чтобы не возникало вращение их из-за трения между шарами и поверхностью стола. Отклоним в сторону шар 1. Ударившись о шар 2 со скоростью v , он передаст ему эту скорость, а сам остановится. С шаром 2 произойдет то же самое — при ударе о шар 3 он остановится, а шар 3 придет в движение со скоростью v . Этот процесс будет повторяться с каждым впереди находящимся шаром. В конце концов последний шар отскочит со скоростью v , а все прочие шары останутся в состоянии покоя.

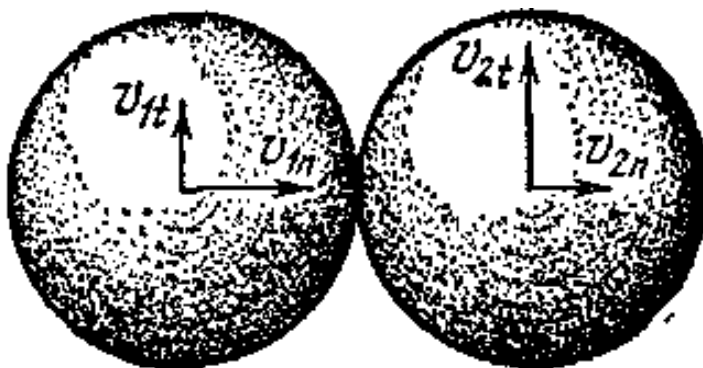


Рисунок 45 – Тангенциальные и нормальные составляющие скорости

Отклоним теперь два шара. При возвращении в нижнее положение они приобретут одну и ту же скорость v и, двигаясь с такой скоростью, ударят впереди находящийся шар (см. рисунок 46). Оказывается, что в результате удара отскочат два последних шара со скоростью v , а все остальные шары останутся в покое. Явление можно объяснить следующим образом. Шар 2 ударяет в шар 3.



Рисунок 46 – Соударения упругих шаров одинаковой массы

В результате этого шар 2 останавливается, а шар 3 приобретает скорость v . Однако шар 2 сразу же подвергается удару со стороны шара 1 и снова приобретает прежнюю скорость v . Таким образом, шар 1 придет в состояние покоя, а шары 2 и 3 будут двигаться вместе со скоростью v . Повторяя это рассуждение, найдем, что затем остановится шар 2, а начнут двигаться шары 3 и 4 и т. д. В конце концов скорость v приобретут два последних шара, а все остальные шары придут в состояние покоя. Вместо двух можно отклонить три, четыре и т. д. шара, сообщив им одну и ту же скорость v . После удара отскочит такое же количество шаров, а остальные шары останутся неподвижными.

Рассмотрим теперь **нецентральный удар** твердых упругих шаров. Так называется столкновение, когда в момент удара начальные скорости шаров не совпадают по направлению с линией центров. Разложим в момент столкновения начальную скорость каждого шара на нормальную v_n и тангенциальную v_t составляющие, т. е. составляющие вдоль линии центров и перпендикулярно к ней (см. рисунок 47). Так же поступим с конечными скоростями шаров в момент начала их разлета. Тогда законы сохранения импульса и энергии запишутся в виде

$$\begin{aligned} m_1 v'_{1n} + m_2 v'_{2n} &= m_1 v_{1n} + m_2 v_{2n}, & m_1 v'_{1t} + m_2 v'_{2t} &= m_1 v_{1t} + m_2 v_{2t}, \\ \frac{1}{2} m_1 (v'^2_{1n} + v'^2_{1t}) + \frac{1}{2} m_2 (v'^2_{2n} + v'^2_{2t}) &= \frac{1}{2} m_1 (v^2_{1n} + v^2_{1t}) + \frac{1}{2} m_2 (v^2_{2n} + v^2_{2t}). \end{aligned} \quad (20)$$

Получилось всего три уравнения для определения четырех неизвестных v'_{1n} , v'_{1t} , v'_{2n} , v'_{2t} . Чтобы написать недостающее уравнение, введем предположение, что при столкновении шаров не возникают тангенциальные силы. В сущности, ввести такое предположение вынуждает нас закон сохранения энергии, уже использованный при написании наших уравнений. Действительно, если бы тангенциальные скорости сталкивающихся шаров были

одинаковы ($v_{1t} = v_{2t}$), то рассматриваемый случай сводился бы к случаю центрального удара, уже разобранным выше. Для этого достаточно было бы перейти в систему отсчета, в которой $v_{1t} = v_{2t}$. Поэтому без ущерба для общности мы будем предполагать, что $v_{1t} \neq v_{2t}$. Но тогда, если бы при столкновении развивались тангенциальные силы трения скольжения, механическая энергия не могла бы сохраняться. Поэтому, предполагая удар идеально упругим, мы должны считать сами шары идеально гладкими. При их столкновении тангенциальные силы не возникают. Если так, то не происходит также изменения тангенциальных скоростей, и к уравнениям (20) следует присоединить уравнения $v'_{1t} = v_{1t}$, $v'_{2t} = v_{2t}$. Тогда останутся только уравнения для нормальных скоростей, отличающиеся от уравнений (7) лишь обозначениями. В результате мы приходим к следующему заключению.

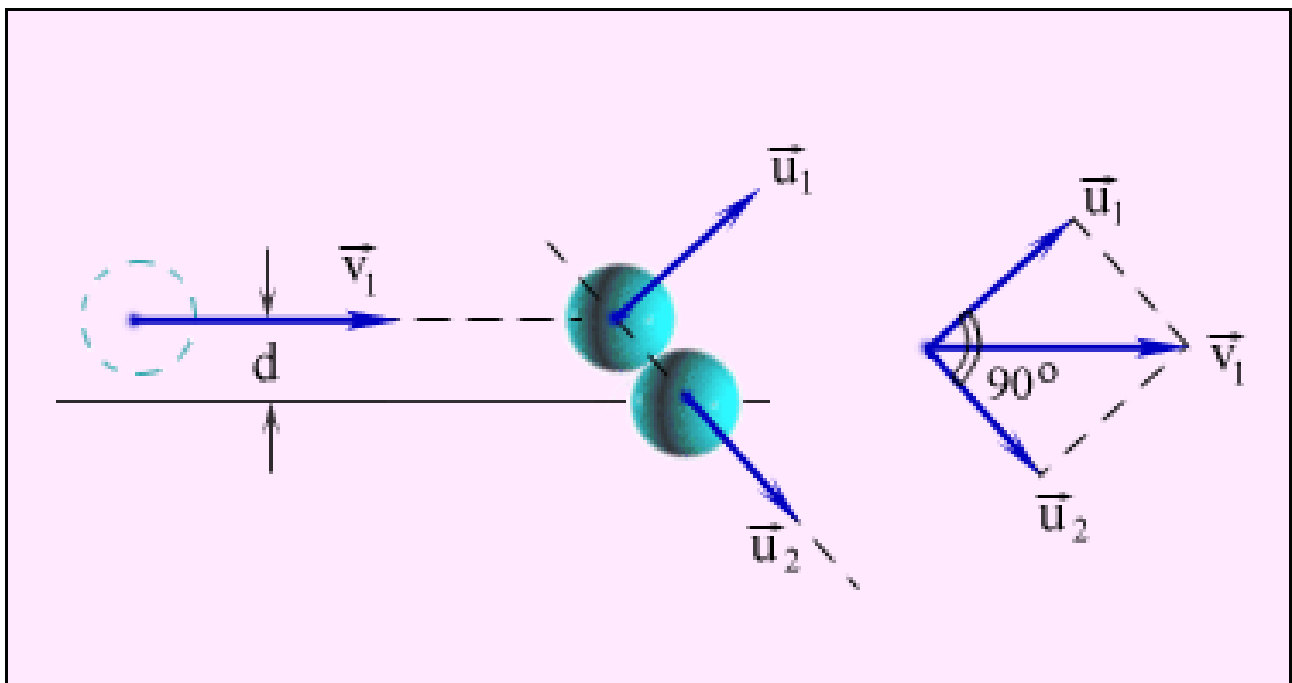


Рисунок 47 – Диаграмма импульсов при нецентральном ударе

При столкновении гладких идеально упругих шаров их тангенциальные скорости не изменяются. Нормальные же скорости изменяются так же, как и скорости при центральном ударе. В частности, при столкновениях не изменяются состояния вращения шаров. Это было бы возможно только при наличии тангенциальных сил. Если шары одинаковы, то при столкновении они обмениваются нормальными скоростями, тангенциальные скорости их остаются неизменными.

Отметим случай, когда масса одного из шаров бесконечно велика. В этом случае скорость большего шара при столкновении вообще не изменяется. Устремляя радиус этого шара к бесконечности, в пределе приходим к задаче о столкновении гладкого упругого шара с гладкой плоской стенкой. Если связать

систему отсчета с такой стенкой, то можно сказать, что при столкновении с ней тангенциальная скорость шара не меняется, а нормальная меняет знак. Это значит, что шар отражается от стенки «зеркально»: его скорость по величине не изменяется, а угол падения равен углу отражения.

2.1.4 Механические колебания

В зависимости от характера воздействия, оказываемого на колеблющуюся систему, различают свободные (собственные), затухающие, вынужденные колебания, автоколебания и параметрические колебания. Свободные (собственные) колебания – это колебания, которые совершает система, выведенная из положения равновесия и предоставленная самой себе.

Колебание гармонического осциллятора является очень важным примером периодического движения и может служить точной или приближенной моделью во многих задачах классической и квантовой физики. К числу классических систем, аналогичных гармоническому осциллятору, могут быть отнесены любые системы, которые, будучи слегка выведены из положения равновесия, совершают устойчивые колебания. К ним относятся:

1. Математический маятник в пределах малых углов отклонения.
2. Масса на пружине в пределах малых амплитуд колебаний.
3. Электрический контур, состоящий из самоиндукции и емкости, для токов или напряжений столь малых, что элементы контура можно считать линейными.

Электрический или механический элемент контура может считаться линейным, если смещение из положения равновесия прямо пропорционально возбуждающей силе. Большинство явлений в физике (не все из которых представляют интерес) могут считаться линейными, если рассматриваемая область достаточно мала, и большинство кривых, с которыми приходится иметь дело, в небольших пределах могут считаться прямыми линиями.

Наиболее важными свойствами гармонического осциллятора являются следующие:

1. Частота колебаний не зависит от амплитуды.
2. Если действуют несколько возбуждающих сил, то эффект их суммарного действия может быть получен в результате сложения эффектов от каждой силы в отдельности (принцип суперпозиции).

Математический маятник состоит из материальной точки массой M , расположенной на нижнем конце невесомого стержня (или нити) длиной L , свободно вращающегося вокруг оси, проходящей через его верхний конец (см. рисунок 48).

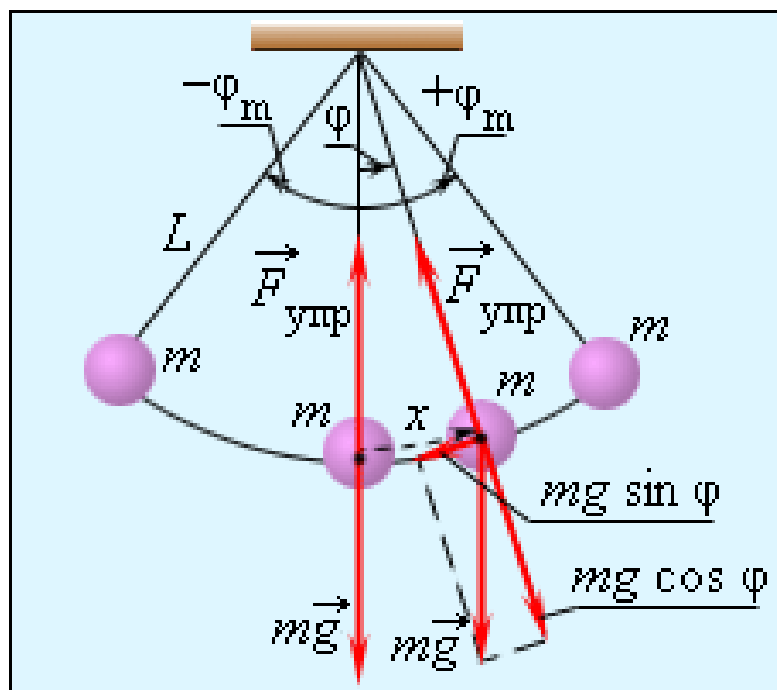


Рисунок 48 – Математический маятник

Задача заключается в том, чтобы найти частоту собственных колебаний маятника. Самый простой путь решения этой задачи состоит в том, чтобы написать в соответствующем виде второй закон динамики $\mathbf{P} = \mathbf{Ma}$. Решим эту задачу, исходя из закона сохранения энергии. Можно также исходить и из момента импульса. Отклонения маятника будем измерять углом θ , который стержень образует с вертикалью.

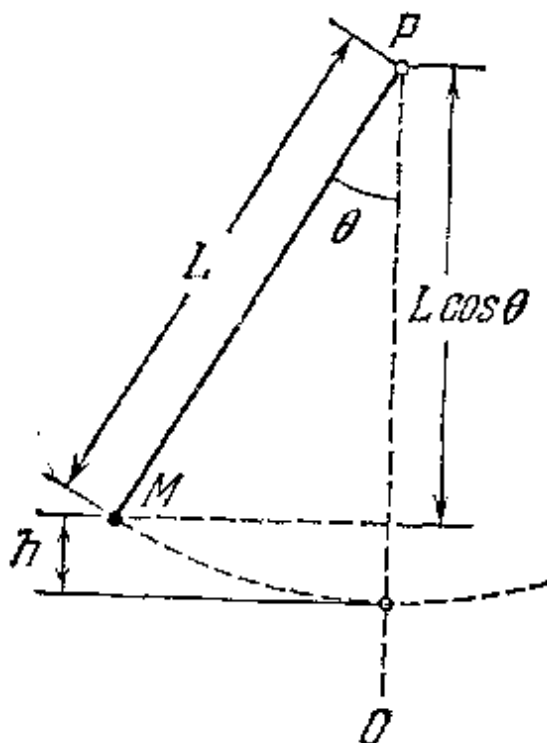


Рисунок 49 - К выводу уравнения колебаний маятника

Как видно из рисунка 49, когда стержень отклонен на угол θ , его нижний конец поднимается на величину

$$h = L - L\cos\theta \quad (21)$$

Потенциальная энергия массы M в гравитационном поле Земли равна

$$U(h) = Mgh \quad (22)$$

При этом неотклоненному положению приписывается нулевое значение потенциальной энергии. Подставляя (21) в (22), получаем

$$U(\theta) = MgL(1 - \cos\theta) \quad (23)$$

Кинетическая энергия маятника равна

$$K = \frac{MV^2}{2} = \frac{1}{2}ML^2\ddot{\theta}^2 \quad (24)$$

где $V = L\ddot{\theta}$ означает скорость, выраженную через скорость изменения угла отклонения. Полная энергия равна

$$E = K + U = \frac{1}{2}ML^2\ddot{\theta} + MgL(1 - \cos\theta) \quad (25)$$

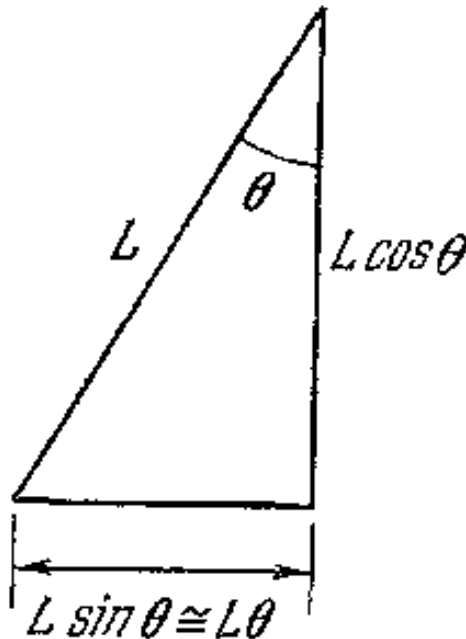


Рисунок 50 - Из теоремы Пифагора и выражения для биннома Ньютона

вытекает, что $\cos \theta \cong 1 - \frac{1}{2}\theta^2$ для $\theta \ll 1$ рад

Из закона сохранения энергии известно, что эта сумма должна сохраняться постоянной. Воспользуемся этим фактом, чтобы получить выражение для частоты движения, хотя возможно. Если принять во внимание соотношение (см. рисунок 50)

$$\cos \theta \cong 1 - \frac{1}{2} \theta^2 \quad (26)$$

то для $\theta \ll 1$ рад мы можем, вместо (25), для энергии написать следующее приближенное соотношение:

$$E \approx \frac{1}{2} ML^2 \ddot{\theta} + \frac{1}{2} MgL \theta^2 \quad (27)$$

Решая это уравнение относительно θ , находим

$$\frac{d\theta}{dt} = \left(\frac{2E - MgL\theta^2}{ML^2} \right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{g}{L^2} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{2E}{MgL} - \theta^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (28)$$

Обозначим конечные (поворотные) точки движения через $-\theta_0$ и θ_0 ; тогда амплитуда колебаний будет равна θ_0 . В этих точках маятник на мгновение остается в покое, и его кинетическая энергия в эти моменты равна нулю (см. рисунок 51).

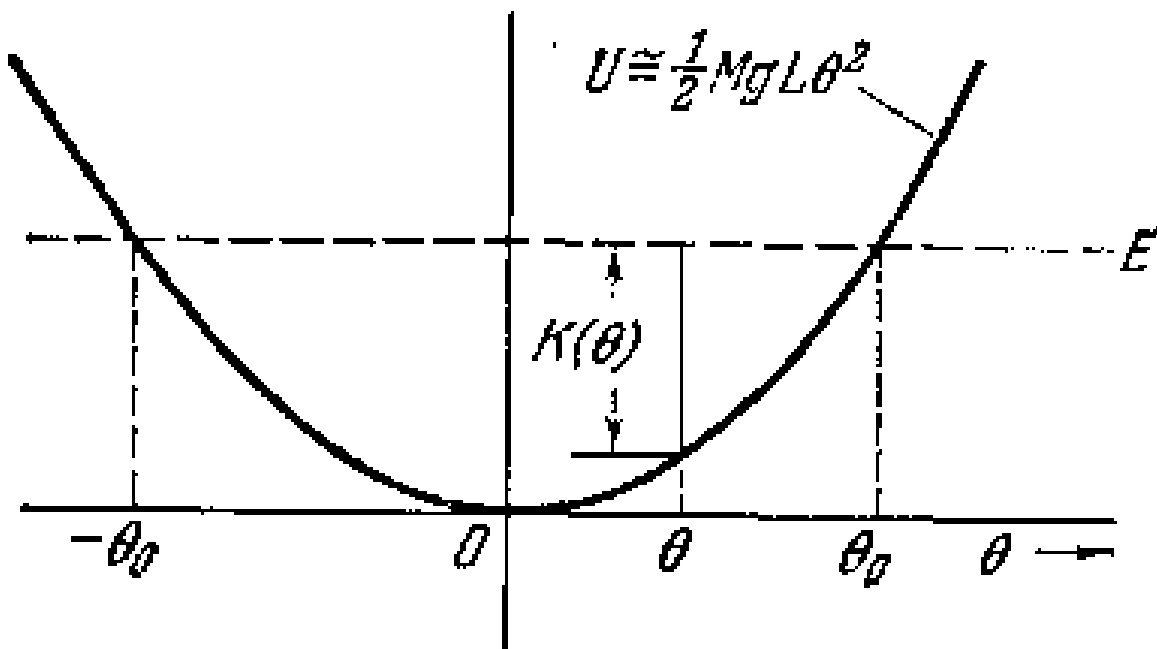


Рисунок 51 - Маятник совершает колебания в пределах от $-\theta_0$, до $+\theta_0$. В этих «поворотных точках» $K=0$ и $E=0$

Из (26) при $\theta = 0$ мы получаем

$$E = \frac{1}{2} MgL \theta_0^2, \quad \theta_0^2 = \frac{2E}{MgL} \quad (29)$$

Таким образом, мы можем переписать (28) в следующем виде:

$$\frac{d\theta}{dt} = \left(\frac{g}{L} \right)^{1/2} (\theta_0^2 - \theta^2)^{1/2} \quad (30)$$

или

$$\frac{d\theta}{(\theta_0^2 - \theta^2)^{1/2}} = \left(\frac{g}{L} \right)^{1/2} dt \quad (31)$$

Этот вид удобен для интегрирования.

Если начальное условие или фаза движения таковы, что при $t=0$ $\theta = \theta_0$, то

$$\int \frac{d\theta}{(\theta_0^2 - \theta^2)^{1/2}} = \left(\frac{g}{L} \right)^{1/2} \int dt \quad (32)$$

Интеграл, стоящий слева, элементарен и легко вычисляется

$$\int \frac{d\theta}{(\theta_0^2 - \theta^2)^{1/2}} = \left[\arcsin \frac{\theta}{\theta_0} \right]_{\theta_0}^{\theta} = \arcsin \frac{\theta}{\theta_0} - \arcsin \frac{\theta_1}{\theta_0} = \left(\frac{g}{L} \right)^{1/2} t \quad (33)$$

Так как $\sin \arcsin \frac{\theta}{\theta_0} = \frac{\theta}{\theta_0}$, то мы можем переписать (32) в виде

$$\frac{\theta}{\theta_0} = \sin \left[\left(\frac{g}{L} \right)^{1/2} t + \arcsin \frac{\theta_1}{\theta_0} \right] \quad (34)$$

или

$$\theta = \theta_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (35)$$

где мы можем для угловой частоты и фазы написать, что

$$\omega_0 = \left(\frac{g}{L} \right)^{1/2}, \quad \varphi = \arcsin \frac{\theta_1}{\theta_0} \quad (36)$$

Здесь φ — постоянная движения. Хотя эта величина имеет размерность угла, ее нельзя наглядно изобразить в виде какого-то угла. Необходимо различать три угловые величины:

1. θ_0 — максимальная амплитуда колебаний.

2. θ_1 — угол, при котором движение начинается в момент времени $t=0$. Маятник может быть приведен в движение из положения $\theta = \theta_1$ либо с нулевой, либо с некоторой начальной скоростью. В зависимости от этого θ_0 будет иметь то или иное значение.

3. Угол φ , вообще говоря, не является углом в обычном смысле, и его нельзя указать при движении осциллятора. Он зависит от θ_1 и θ_2 и представляет собой соответствующую поправку к выражению $\theta = \theta_0 \sin \omega_0 t$ когда движение начинается не со значения $t=0$. Из соответствующих начальных условий мы можем найти значение φ из (36).

Символом ω_0 , часто обозначается угловая частота собственного или свободного движения колеблющейся системы. Индекс «нуль» при ω_0 не имеет отношения к моменту времени $t=0$. Угловая частота ω_0 связана с частотой f_0 свободных колебаний маятника соотношением

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} \quad (37)$$

Задачу о математическом маятнике можно решить также и исходя из уравнений движения. Уравнение (30) было получено из закона сохранения энергии, записанного в виде соотношения (25). Отметим, что уравнение (30) представляет собой дифференциальное уравнение первого порядка, интегрируя которое один раз, мы получили соотношение (23). Уравнение же движения, как это будет ясно из дальнейшего, представляет собой дифференциальное уравнение второго порядка. И для того, чтобы найти выражение для угла отклонения, его нужно проинтегрировать дважды. Поэтому ясно, что применение закона сохранения энергии очень часто может избавить нас от одного интегрирования.

Расположим ось x перпендикулярно плоскости движения (см. рисунок 52). Момент N_x , создаваемый силой тяжести $F = Mg$, относительно точки подвеса маятника равен

$$N_x = (\vec{r} \times \vec{p})_x = LMg \sin \theta \quad (38)$$

Момент импульса J_x относительно той же точки равен

$$J_x(\vec{r} \times \vec{p})_x = -ML^2\theta \quad (39)$$

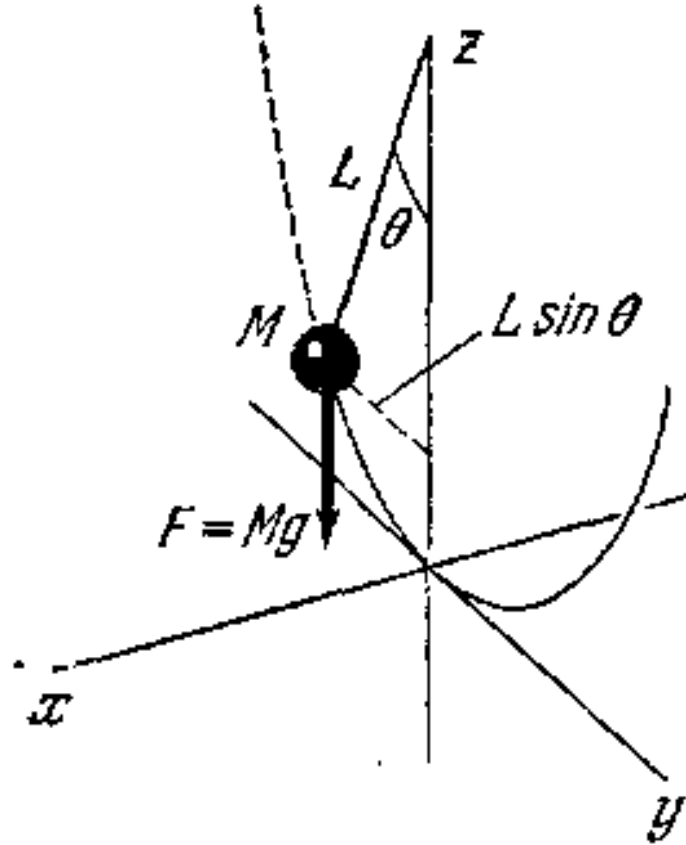


Рисунок 52 – Силы, действующие на маятник

где $p = ML\ddot{\theta}$ представляет собой импульс. Известно, что скорость изменения момента импульса равна моменту действующей силы (уравнение моментов), т.е.

$$ML^2\ddot{\theta} = -ML\sin\theta \quad (40)$$

Отсюда для уравнения движения получаем

$$\ddot{\theta} + \frac{g}{L}\sin\theta = 0 \quad (41)$$

В пределе $\theta \ll 1$, при малых углах отклонения, можно приближённо заменить $\sin\theta$ на θ , и тогда (41) примет вид:

$$\ddot{\theta} + \frac{g}{L}\theta = 0 \quad (42)$$

Это соотношение представляет собой уравнение движения гармонического осциллятора, угловая частота которого равна

$$\omega_0 = \left(\frac{g}{L} \right)^{1/2} \quad (43).$$

2.2 МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

2.2.1 Эмпирические законы идеальных газов

В молекулярно-кинетической теории пользуются *идеализированной моделью идеального газа*, согласно которой считают, что:

- 1) собственный объем молекул газа пренебрежимо мал по сравнению с объемом сосуда;
- 2) между молекулами газа отсутствуют силы взаимодействия;
- 3) столкновения молекул газа между собой и со стенками сосуда абсолютно упругие.

Модель идеального газа можно использовать при изучении реальных газов, так как они в условиях, близких к нормальным (например, кислород и гелий), а также при низких давлениях и высоких температурах близки по своим свойствам к идеальному газу. Кроме того, внося поправки, учитывающие собственный объем молекул газа и действующие молекулярные силы, можно перейти к теории реальных газов.

Рассмотрим законы, описывающие поведение идеальных газов. Изобарный (изобарический) процесс - то процесс, происходящий при постоянном давлении: $p = \text{const}$ (см. рисунок 53). Температуры в точках $p_1 V_1$ и $p_2 V_2$ определяются уравнением состояния и равны соответственно $T_1 = p_1 V_1 / R$, $T_2 = p_1 V_2 / R$. При этом процессе с увеличением объема к системе необходимо подводить теплоту, для того чтобы обеспечить постоянство давления. Работа в процессе определяется интегралом

$$A = \int_{(1)}^{(2)} p_1 dV = p_1 (V_2 - V_1). \quad (44)$$

Работа в координатах p, V равна площади между кривой, изображающей процесс, осью V и вертикалями, проходящими через начальную и конечную абсциссы. На рисунке 53 эта площадь закрашена.

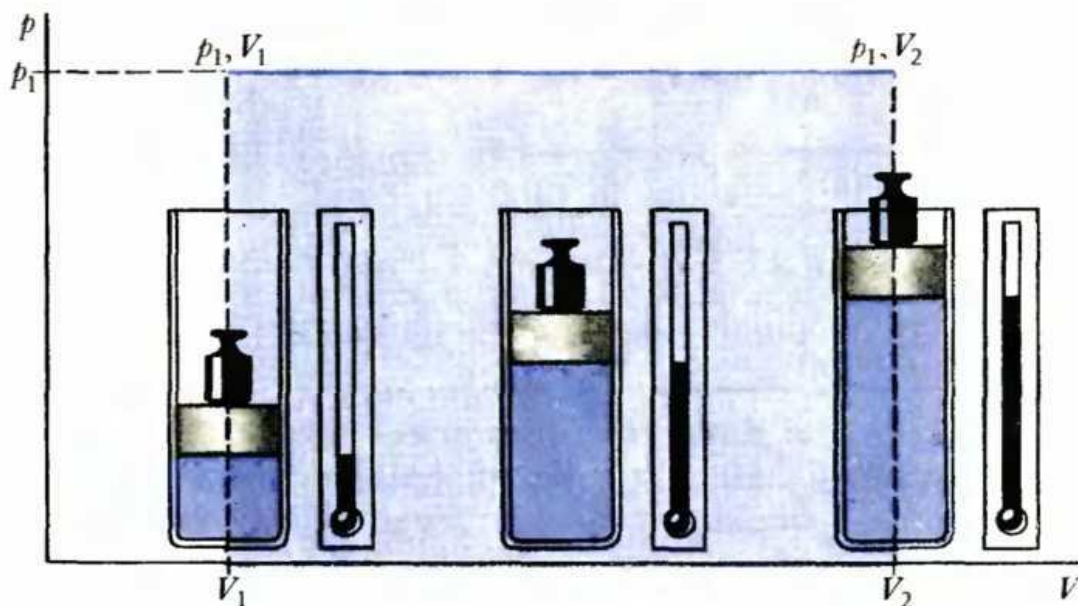


Рисунок 53 - Изобарный процесс в осях (p, V)

В координатах p, T процесс также изображается прямой линией (см. рисунок 54).

Выражение работы в этих переменных имеет вид

$$A = \int_{(1)}^{(2)} p_1 dV = \int_{(1)}^{(2)} p_1 \frac{R}{p_1} dT = R(T_2 - T_1). \quad (45)$$

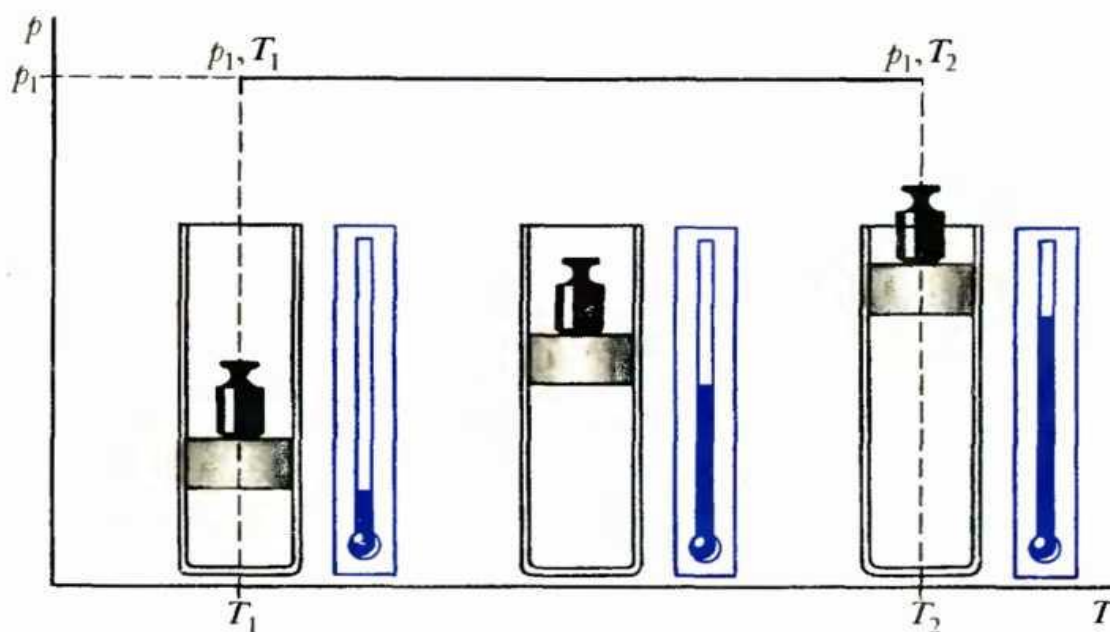


Рисунок 54 - Изобарный процесс в осях (p, T)

Оба эти представления равноценны. От одного из них к другому совершается переход формально с помощью уравнения состояния. Поэтому,

как правило, при изображении процессов пользуются каким-либо одним представлением, преимущественно в координатах p, V .

Изохорный (изохорический) процесс - то процесс, осуществляемый при постоянном объеме: $V = \text{const}$ (см. рисунок 55). Работа в этом процессе равна нулю:

$$A = \int_{(1)}^{(2)} p dV = 0. \quad (46)$$

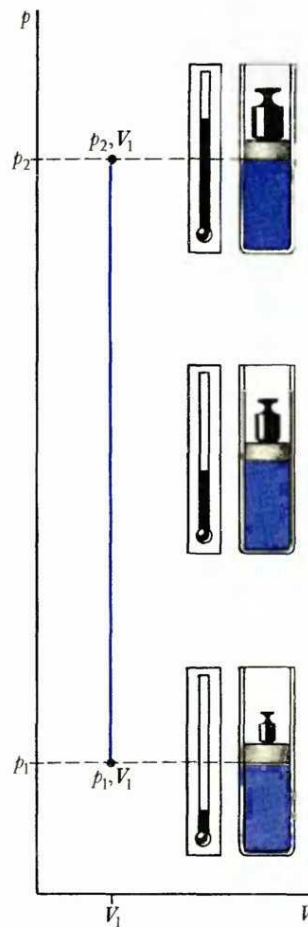


Рисунок 55 - Изохорный процесс

Изотермический процесс - это процесс, осуществляемый при постоянной температуре: $T = \text{const}$ (см. рисунок 56). Работа равна:

$$A = \int_{(1)}^{(2)} p dV = RT \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = RT \ln \frac{V_2}{V_1}. \quad (47)$$

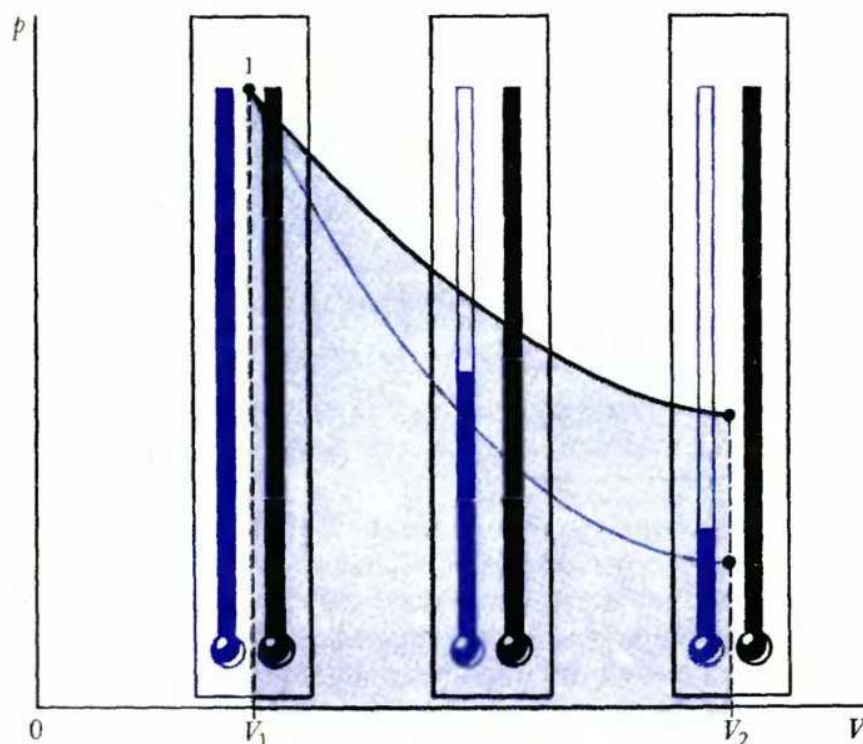


Рисунок 56 - Изотермический процесс (верхняя линия) и адиабатный процесс (нижняя линия)

В этом процессе внутренняя энергия идеального газа не изменяется, так как $T = \text{const}$ и, следовательно, $dU = 0$. Поэтому на основе первого начала термодинамики $\delta Q = \delta A$. Это означает, что в изотермическом процессе все количество теплоты, подводимое извне, идет на совершение работы.

Адиабатный (адиабатический) процесс - это процесс, при котором отсутствует теплообмен с окружающей средой. Поэтому первое начало термодинамики для этого процесса записывается в виде

$$C_V dT + p dV = 0. \quad (48)$$

Очевидно, что $dT < 0$ при $dV > 0$. Следовательно, работа, совершаемая газом при расширении, происходит за счет его внутренней энергии и $dT > 0$ при $dT < 0$, поэтому работа, совершаемая над газом, приводит к увеличению его внутренней энергии и температуры.

Уравнение адиабаты — равенство, связывающее параметры в адиабатическом процессе. Это уравнение называют также уравнением Пуассона. Выведем его.

Из уравнения для идеальных газов получается следующее выражение для T :

$$T = pV / (C_p - C_V), \quad (49)$$

здесь использовано уравнение Майера $R = C_p - C_V$. Разделив уравнение (39) на $C_V T$, найдем

$$\frac{dT}{T} + (\gamma - 1) \frac{dV}{V} = 0, \quad (50)$$

где $\gamma = C_p/C_v$ — показатель адиабаты.

Интегрируя, а затем потенцируя это уравнение, получаем уравнение адиабаты в переменных T, V :

$$TV^{\gamma-1} = \text{const.} \quad (51)$$

Для перехода к переменным p, V исключим из (51) с помощью уравнения состояния $T = pV/R$. Тогда

$$pV^{\gamma} = \text{const.} \quad (52)$$

Аналогично,

$$Tp^{1-\gamma} = \text{const.} \quad (53)$$

В соответствии с уравнением $C_v = \frac{i}{2}R, C_p = \frac{i+2}{2}R$ получаем $\gamma = (i+2)/i$. Поэтому для одноатомных газов, достаточно хорошо удовлетворяющих условию идеальности, $i=3$ и, следовательно, $\gamma=1,66$. Это хорошо подтверждается экспериментом. Например, у гелия $\gamma=1,66$. У двухатомных газов, когда возбуждены лишь вращательные степени свободы, $i=5$ и, следовательно, $\gamma=1,40$. Это также хорошо подтверждается экспериментом. Например, у кислорода, азота и воздуха $\gamma=1,40$, а у водорода $\gamma=1,41$.

Работа при адиабатическом процессе. По общей формуле для работы

$$A = \int_{(1)}^{(2)} p dV = p_1 V_1^{\gamma} \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V^{\gamma}} = \frac{p_1 V_1^{\gamma}}{1-\gamma} (V_2^{-\gamma+1} - V_1^{-\gamma+1}) = \frac{RT_1}{\gamma-1} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} \right], \quad (54)$$

где $p_1 V_1 = RT_1$

Принимая во внимание, что

$$(V_1/V_2)^{\gamma-1} = T_2/T_1, \quad (55)$$

можно выражение (54) преобразовать к виду

$$A = R(T_1 - T_2)/(\gamma - 1). \quad (56)$$

При расширении газа из состояния $p_1 V_1$ до некоторого другого объема V_2 работа при адиабатическом процессе меньше, чем при изотермическом (см. рисунок 57). Это объясняется тем, что при адиабатическом процессе происходит охлаждение газа, в то время как в изотермическом процессе температура поддерживается постоянной за счет притока тепла из термостата. Поэтому в изотермическом процессе при расширении давление газа уменьшается только за счет уменьшения плотности газа, а при адиабатическом — за счет уменьшения плотности и средней кинетической энергии, т. е. температуры.

Политропический процесс. Все рассмотренные процессы обладают одной общей особенностью — они происходят при постоянной теплоемкости. Это непосредственно видно после записи условий процесса в математической форме. При изохорическом и изобарическом процессах теплоемкости равны соответственно C_v и C_p , при изотермическом процессе ($dT=0$) теплоемкость равна $\pm\infty$, а при адиабатическом ($\delta Q=0$) теплоемкость равна 0. Процесс, в котором теплоемкость является постоянной величиной, называется политропическим. Изобарический, изохорический, изотермический и адиабатический процессы являются частными случаями политропического процесса.

Уравнение политропы. Из требования, чтобы теплоемкость C была постоянной в процессе, следует, что первое начало термодинамики должно иметь вид

$$C dT = C_v dT + p dV. \quad (57)$$

Поступая с уравнением (57) точно так же, как с (48), для получения уравнения (50), находим

$$\frac{dT}{T} + \frac{C_p - C_v}{C_v - C} \frac{dV}{V} = 0. \quad (58)$$

Интегрируя (58), получаем

$$TV^{n-1} = \text{const}, \quad (59)$$

где $(C_p - C_v)/(C_v - C) = n - 1$.

Это уравнение политропы в переменных T, V . Исключая из него T с помощью равенства $T = pV/R$, находим

$$pV^n = \text{const}, \quad (60)$$

где $n = (C - C_p)/(C - C_v)$ — показатель политропы.

Очевидно, что при $C = 0$, $n = \gamma$ из (60) получается уравнение адиабаты, при $C = \infty$, $n=1$ — уравнение изотермы, при $C = C_p$, $n = 0$ — уравнение изобары, при $C = C_v$, $n = +(-) \infty$ — уравнение изохоры.

2.2.2 Реальные газы

С повышением давления и уменьшением температуры наблюдаются значительные отклонения от законов идеальных газов. Из большого числа уравнений, предложенных для описания неплотных реальных газов, самым простым и вместе с тем дающим достаточно хорошие результаты оказалось уравнение Ван-дер-Ваальса:

$$\left(p + \frac{av^2}{v^2}\right)(V - vb) = vRT. \quad (61)$$

Газы, точно подчиняющиеся уравнению Ван-дер-Ваальса, называются газами Ван-дер-Ваальса. Наиболее содержательные результаты получаются из уравнения Ван-дер-Ваальса путём анализа его изотерм. Уравнение можно переписать в виде:

$$PV^3 - (RT + Pb)V^2 + aV - ab = 0. \quad (62)$$

Это уравнение третьей степени по V , в которое давление входит в качестве параметра. Поскольку коэффициенты вещественны, то оно имеет либо один вещественный корень, либо три. Каждому корню на плоскости (P, V) соответствует точка, в которой изобара $P=\text{const}$ пересекает изотерму. В первом случае, когда корень один, и точка пересечения будет одна. Так будет при любых давлениях, если температура достаточно высока. Изотерма имеет вид монотонно опускающейся кривой MN . При более низких температурах и надлежащих значениях давления уравнение имеет три корня $V_1V_2V_3$. В таких случаях изобара $P=\text{const}$ пересекает изотерму в трёх точках L, C, G . Изотерма содержит волнообразный участок $LBCAG$. Она сначала монотонно опускается вниз (участок DB), затем на участке BA монотонно поднимается вверх, а за точкой A снова монотонно опускается. При некоторой промежуточной температуре три корня $V_1V_2V_3$ становятся равными. Такая температура и соответствующая ей изотерма называется критической. Критическая изотерма $ФКН$ всюду монотонно опускается вниз, за исключением одной точки K , являющейся точкой перегиба изотермы. В ней касательная к изотерме

горизонтальна. Такая точка называется критической точкой. Соответствующее ей давление, объём и температура называются также критическими. Говорят, что вещество находится в критическом состоянии, если объём и давление и, следовательно, температура равны критическим. Они равны:

$$V_K = 3b, P_K = \frac{a}{27b^2}, T_K = \frac{8a}{27Rb}. \quad (63)$$

Примем в качестве единиц объёма, давления и температуры критические значения этих величин. Объём, давление и температура, измеренные в таких единицах, называются приведёнными. Они определяются выражениями:

$$\varphi = \frac{V}{V_K}, \pi = \frac{P}{P_K}, \tau = \frac{T}{T_K}. \quad (64)$$

Уравнение состояния, записанное в этих безразмерных переменных, называется приведённым уравнением состояния. Для газа Ван-дер-Ваальса

$$V = 3b\varphi, P = \frac{a\pi}{27b^2}, T = \frac{8a\tau}{27Rb} \quad (65)$$

и оно принимает вид:

$$\left(\pi + \frac{3}{\varphi^2}\right)\left(\varphi - \frac{1}{3}\right) = \frac{8}{3}\tau. \quad (66)$$

В этом виде уравнение состояния не содержит никаких индивидуальных констант вещества. Приведённые уравнения состояния одинаковы для всех веществ. Существенно, что оно содержит три параметра a, b, R . Всякое уравнение состояния, обладающее этим свойством, записанное в безразмерных величинах φ, π, τ , должно быть также одинаковым для всех веществ. Это положение называется законом соответственных состояний. Соответственными называются состояния разных веществ, которые имеют одинаковые значения приведённых параметров φ, π, τ . Из закона соответствующих состояний следует, что если для различных веществ из трёх параметров φ, π, τ совпадают значения каких-либо двух, то будут совпадать значения и третьего параметра, т.е. эти вещества находятся в соответственных состояниях.

Не все состояния вещества, совместимые с уравнением Ван-дер-Ваальса, могут быть реализованы в действительности. Для этого необходимо ещё, чтобы они были термодинамически устойчивы. Одно из необходимых условий термодинамической устойчивости физически однородного вещества состоит в выполнении неравенства $\left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_T < 0$. Физически это означает, что при изотермическом увеличении давления объём тела должен уменьшаться. Иными словами, при возрастании V все изотермы должны монотонно опускаться.

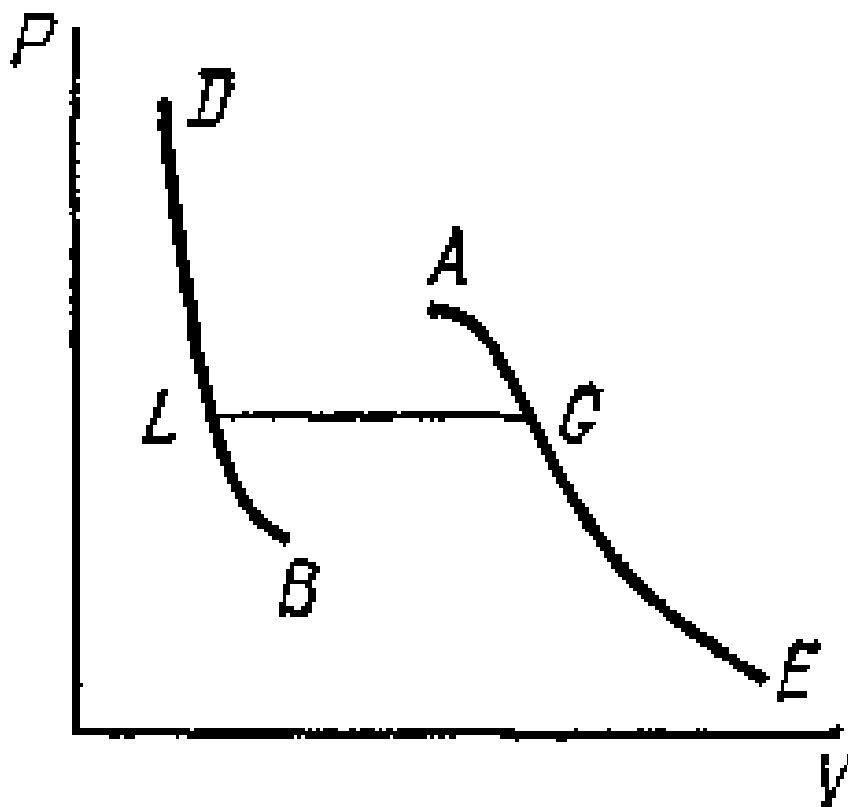


Рисунок 57 - Изотерма Ван-дер-Ваальса

Между тем, ниже критической температуры на изотермах Ван-дер-Ваальса имеются поднимающиеся участки типа ВСА. Точки, лежащие на таких участках, соответствуют неустойчивым состояниям вещества, которые практически реализованы быть не могут. Т.о., реальная изотерма распадается на две ветви ЕГА и ВLD, отделённые друг от друга (см. рисунок 57). Этим двум ветвям соответствуют различные агрегатные состояния вещества. Ветвь ЕА характеризуется относительно большими значениями объёма и малым значением плотности; она соответствует газообразному состоянию вещества. Напротив, ветвь DB характеризуется относительно малыми объёмами, а следовательно, большими плотностями; она соответствует жидкому состоянию вещества. Следовательно, уравнение Ван-дер-Ваальса можно распространить и на область жидкого состояния. Таким путём удаётся получить удовлетворительное качественное описание перехода газа в жидкость и обратно. Экспериментальным путём было установлено, что сжатием можно перевести газ в жидкость только тогда, когда его температура меньше критической. Но это невозможно сделать никаким повышением давления, если температура газа выше критической. Процесс изотермического сжатия двухфазной системы пар-жидкость изображается участком GL горизонтальной прямой. При этом во время сжатия плотности жидкости и газа остаются неизменными и равными из значениям в точках L и G соответственно. По мере сжатия количество вещества в газообразной фазе непрерывно уменьшается, а в жидкой фазе – увеличивается, пока не будет достигнута точка L, в которой всё

вещество перейдёт в жидкое состояние. Правило Максвелла: Прямую GCL надо проводить так, чтобы равнялись площади GACG и CBLC. Если за исходное состояние вещества взять жидкое (точка D на изотерме), то при изотермическом расширении точка, изображающего его состояние, будет перемещаться вниз по изотерме, пока она не достигнет положения L, начиная с которого новая – газообразная – фаза. Дальнейший изотермический процесс расширения двухфазной системы пойдёт вдоль горизонтального участка изотермы LCG. В точке G всё вещество перейдёт в газообразное состояние. Затем изотермическое расширение идёт по участку изотермы GE, причём вещество всё время остаётся в газообразном состоянии. При специальных условиях могут быть реализованы состояния, изображаемые участками изотермы GA и BL. Эти состояния называются метастабильными. Участок GA изображает т.н. пересыщенный пар, а участок BL – перегретую жидкость. Обе фазы обладают ограниченной устойчивостью. Каждая из них может существовать до тех пор, пока она не граничит с другой, более устойчивой фазой (например, пересыщенный пар переходит в насыщенный пар, если в него ввести каплю жидкости. Перегретая жидкость закипает, если в неё попадают пузырьки воздуха или пара).

На рисунке 58 изображено семейство реальных изотерм. Кривая ALKG (жирная), соединяющая концы горизонтальных участков изотерм, делит плоскость VT на две области. Область между кривой ALKG и изобарой $P=0$ соответствует двухфазным состояниям вещества. Это значит, что каждая точка этой области изображает такое состояние вещества, в котором оно не является физически однородным, а состоит из жидкости и её насыщенного пара. Ниже изобары $P=0$ двухфазное состояние невозможно, т.к. давление пара не может быть меньше нуля. Область над кривой ALKG и ниже изобары $P=0$, напротив, соответствует однофазным состояниям. Каждая точка этой области изображает состояние физически однородного вещества.

Впрочем, точки над граничной кривой ALKG, наряду с двухфазным состоянием вещества, могут изображать и однофазные состояния, которым соответствуют теоретические изотермы, имеющие волнообразный характер. Это, во-первых, метастабильные состояния – перегретая жидкость и пересыщенный пар. Во-вторых, это абсолютно неустойчивые состояния, которым соответствуют поднимающиеся участки теоретических изотерм. Такие состояния могут играть роль только в теоретических рассуждениях. Перегретой жидкостью и пересыщенным паром не исчерпывается многообразие метастабильных состояний.

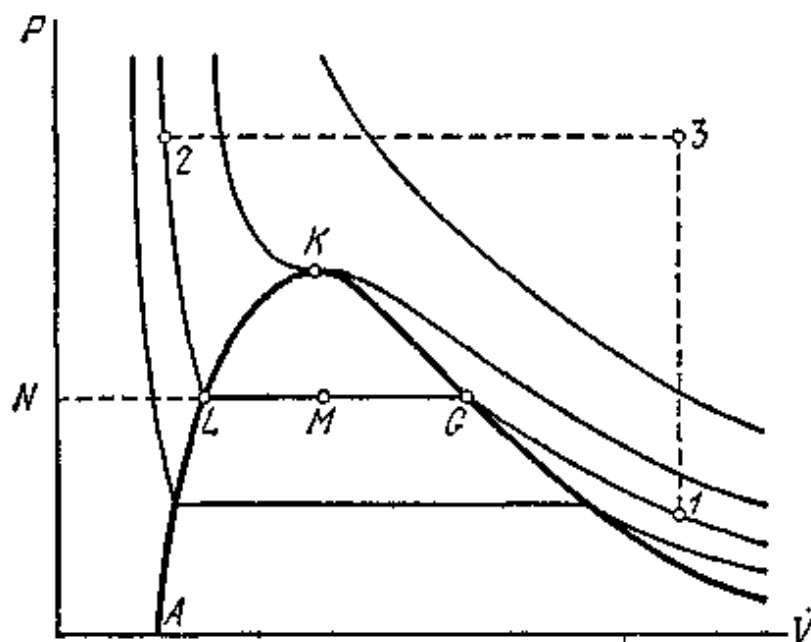


Рисунок 58 - Изотермы реального и идеального газа

Другими примерами являются переохлаждённые жидкости и различные кристаллические модификации твёрдых тел. Жидкость, охлаждённая до температуры ниже температуры затвердевания, называется переохлаждённой жидкостью. Она является менее устойчивой, чем кристаллическая фаза при той же температуре и давлении. Поэтому, если жидкость не очищена от посторонних вкраплений, способных выполнять функции зародышей кристаллической фазы, то переохлаждения не наблюдается. При охлаждении жидкости кристаллизация начинается при температуре плавления, соответствующей тому давлению, под которым находится жидкость. Скорость кристаллизации переохлаждённой жидкости при наличии в ней зародышей сильно зависит от температуры. При понижении температуры за точку кристаллизации скорость кристаллизации сначала растёт, достигает максимума, а затем падает. При очень больших переохлаждениях скорость кристаллизации делается практически равной нулю. При достаточно больших переохлаждениях начинается самопроизвольное образование зародышей. Обычно максимум скорости самопроизвольного образования зародышей находится при более низкой температуре, чем максимум скорости кристаллизации. Переохлаждёнными жидкостями являются расплавленный сахар, мёд, асфальт, сапожный вар, стекло, различные пластмассы. Ярким примером, иллюстрирующим роль зародышей в полиморфных превращениях, может служить явление, известное под названием «оловянной чумы». Существуют 2 модификации твёрдого олова – обычное (белое) и порошкообразное (серое). При атмосферном давлении эти модификации находятся в равновесии друг с другом при температуре 18. Выше 18 более устойчиво белое олово, ниже 18 – серое. После сильного мороза при потеплении оловянные предметы, если в них есть подходящий зародыш, могут рассыпаться в порошок. Это явление и называется «оловянной чумой».

2.3 ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ

2.3.1 Заряженная частица в электрическом поле

Движение заряженных частиц в электрическом поле рассмотрим для двух случаев: постоянном и переменном однородных полях. Поле называется однородным, если вектор напряжённости этого поля во всех точках одинаков. Постоянное поле – это такое поле, значение вектора напряжённости которого не изменяется с течением времени, а переменное поле – вектор напряжённости которого меняется со временем. Постоянное поле также называют стационарным (т.е. не зависящим от времени).

Сила, действующая на частицу с зарядом q и массой m в электрическом поле $\vec{E}$, однородном в пространстве и постоянном во времени, определяется следующим соотношением:

$$\vec{F} = m\vec{a} = q\vec{E} \quad (67)$$

По второму закону Ньютона благодаря этой силе частица приобретает ускорение, равное:

$$\vec{a} = \frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = \frac{q}{m}\vec{E} \quad (68)$$

Так как $d\vec{V} = \vec{a}dt$, то выполнив интегрирование, находим выражение для скорости частицы:

$$\vec{V} = \int \vec{a}dt = \int \frac{q\vec{E}}{m}dt = \frac{q\vec{E}}{m} \int dt \quad (69)$$

Откуда

$$\vec{V} = \frac{q\vec{E}}{m}t + \vec{V}_0 \quad (70)$$

Интегрируя это выражение ещё раз (т.к. $d\vec{r} = \vec{V}dt$), получаем уравнение для радиус-вектора частицы в виде:

$$\vec{r} = \int \vec{V}dt = \int \left(\frac{q\vec{E}}{m}t + \vec{V}_0 \right) dt, \quad (71)$$

$$\vec{r} = \frac{q\vec{E}}{2m}t^2 + \vec{V}_0t + \vec{r}_0 \quad \vec{r} = \frac{q\vec{E}}{2m}t^2 + \vec{V}_0t + \vec{r}_0 \quad (72)$$

Это уравнение в общем виде позволяет находить радиус-вектор движущейся в электрическом поле заряженной частицы. Здесь $\vec{r}_0$ – начальное

положение частицы в начальный момент времени $t=0$, а $\vec{V}_0$ – начальная скорость частицы.

Однако, чтобы найти частное решение необходимо использовать начальные условия и найти недостающие постоянные интегрирования. Если положить, что в начальный момент времени $t=0$ частица находилась в начале координат, т.е. $\vec{r}_0 = 0$, то

$$\vec{r} = \frac{q\vec{F}}{2m}t^2 + \vec{V}_0t, \vec{V} = \frac{q\vec{F}}{m}t + \vec{V}_0 \quad (73)$$

Если начальная скорость частицы равна нулю, т.е. $\vec{V}_0 = 0$ при $t = 0$, то

$$\vec{r} = \frac{q\vec{F}}{2m}t^2 + \vec{r}_0, \quad (74)$$

$$\vec{V} = \frac{q\vec{F}}{m}t. \quad (75)$$

Если же в начальный момент времени скорость частицы была равна нулю и она находилась в начале координат (отсчёта), то получим следующие уравнения:

$$\vec{r} = \frac{q\vec{F}}{2m}t^2, \quad (76)$$

$$\vec{V} = \frac{q\vec{F}}{m}t. \quad (77)$$

Найдём выражение для траектории движения частицы в электрическом поле. Пусть частица влетает в постоянное однородное электрическое поле плоского конденсатора так, что вектор скорости образует с осью, параллельной пластинам конденсатора, угол α . Введём прямоугольную декартову систему координат так чтобы, ось X была параллельно пластинам конденсатора. Тогда в проекциях на оси можно записать:

$$OX: y = y_0 + V_x t + \frac{qF}{2m}t^2 \quad (78)$$

$$OY: y = y_0 + V_y t \quad (79)$$

Здесь учтено, что электрическая сила действует только по оси OY , а по оси OX частица движется прямолинейно и равномерно.

Будем считать, что в начальный момент времени частица находилась в начале координат, т.е.:

$$OY: y = V_y t + \frac{qF}{2m}t^2 \quad (80)$$

$$OX: x = V_x t \quad (81)$$

Для того, чтобы найти уравнение траектории, необходимо исключить время из обоих этих уравнений. Выражая время из второго уравнения и подставляя его в первое, получим:

$$y = V_y \frac{x}{V_x} + \frac{qF}{2m} \left(\frac{x}{V_x} \right)^2 \quad (82)$$

или

$$y = V_y \frac{x}{V_x} + \frac{qF}{2m} \frac{x^2}{V_x^2} \quad (83)$$

Проектируя вектор скорости на оси будем иметь:

$$V_x = V_0 \cos \alpha, V_y = V_0 \sin \alpha \quad (84)$$

Подставляем полученные проекции:

$$y = V_0 \sin \alpha \frac{x}{V_0 \cos \alpha} + \frac{qF}{2m} \frac{x^2}{V_0^2 \cos^2 \alpha} \quad (85)$$

Выполнив элементарные преобразования, окончательно для траектории будем иметь следующее выражение:

$$y = x \operatorname{tg} \alpha + \frac{qF}{2m V_0^2 \cos^2 \alpha} x^2 \quad (86)$$

Из этого уравнения видно, что уравнением траектории является парабола.

Исходя из общих полученных уравнений можно сделать следующие выводы о движении заряженной частицы в постоянном электрическом поле:

1. Частица имеет постоянное ускорение $\vec{a} = \frac{q}{m} \vec{E}$ (см. рисунок 59)

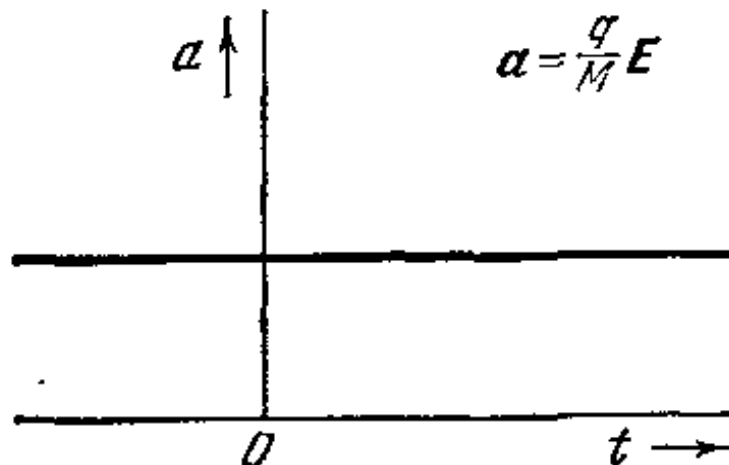


Рисунок 59 – Ускорение движения частицы в постоянном поле

2. Её скорость линейно изменяется в зависимости от времени $\vec{V} = \frac{q\vec{F}}{m}t + \vec{V}_0$. Движение может быть как равноускоренным, так и равнозамедленным (см. рисунок 60)

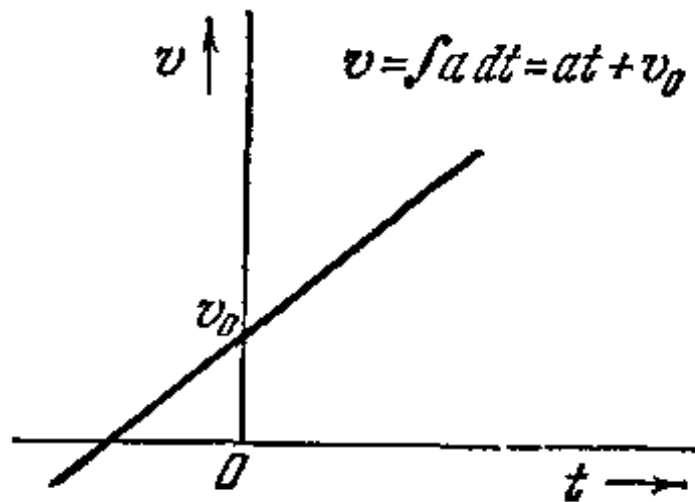


Рисунок 60 – Скорость движения частицы в постоянном поле

3. Величина перемещения представляет собой квадратичную функцию времени $\vec{r} = \frac{q\vec{F}}{2m}t^2 + \vec{V}_0t + \vec{r}_0$ (см. рисунок 61)

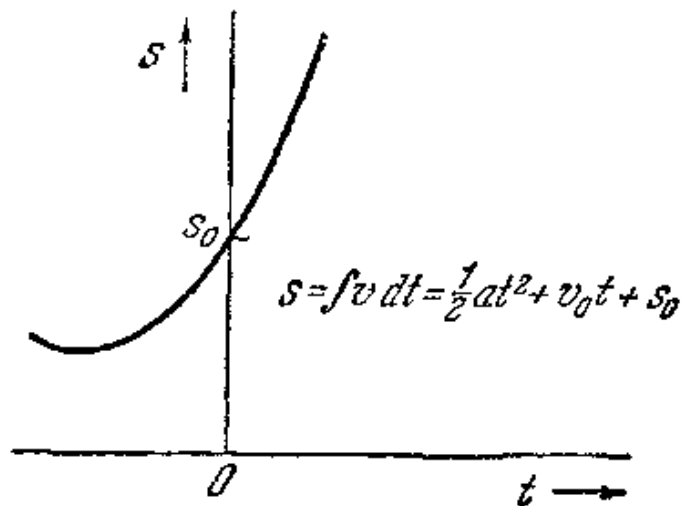


Рисунок 61 – Перемещение частицы в постоянном поле

Необходимо рассмотреть также два частных случая движения заряженной частицы:

1. Частица движется параллельно силовым линиям электрического поля. В этом случае заряженная в зависимости от знака и направления поля будет либо ускоряться, либо тормозить. Пусть в поле влетает электрон. Если он влетает противоположно направлению линиям электрического поля, то ускоряется, и наоборот, тормозит, если влетает по линиям поля. В случае торможения начальная скорость электрона

уменьшается до его полной остановки и он начинает двигаться равноускоренно в противоположном направлении.

2. Частица влетает перпендикулярно линиям электрического поля. В этом случае

$$V_x = 0, V_y = V_0 \quad (87)$$

$$y = \frac{qF}{2mV_0^2} x^2 \quad (88)$$

В зависимости от заряда частицы она будет отклоняться ту или иную сторону. Отрицательно заряженные частицы отклоняются против направления поля, т.е. к положительной пластине конденсатора.

Рассмотрим теперь движение заряженной частицы в переменном электрическом поле, напряжённость которого изменяется согласно уравнению

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \sin \omega t \quad (89)$$

В этом случае уравнение движения имеет вид

$$\frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = \frac{q}{m} \vec{E}_0 \sin \omega t \quad (90)$$

Или, в проекции на ось x

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{q}{m} E_{0x} \sin \omega t \quad (91)$$

Интегрируя, находим выражение для скорости:

$$V_x = \int \frac{q}{m} E_{0x} \sin \omega t dt = \frac{q}{m} E_{0x} \int \sin \omega t dt \quad (91)$$

$$V_x = -\frac{q}{m\omega} E_{0x} \cos \omega t + V_0 \quad (92)$$

Интегрируя это выражение, получим выражение для координаты:

$$x = -\frac{q}{m\omega^2} E_{0x} \sin \omega t + V_0 t + x_0 \quad (93)$$

Это уравнение решает поставленную задачу.

В начальный момент времени $t=0$ скорость частицы равна:

$$V_x = -\frac{q}{m\omega} E_{0x} + V_0 \quad (94)$$

Если скорость частицы равна нулю в начальный момент времени, то движение частицы складывается из колебания и поступательного движения, совершаемого в одном и том же направлении с постоянной скоростью $\frac{qE_{0x}}{m\omega}$ (см.

рисунок 62). Это происходит потому, что в данной частной задаче скорость частицы никогда не изменяет знака. Частица непрерывно перемещается в одном и том же направлении.

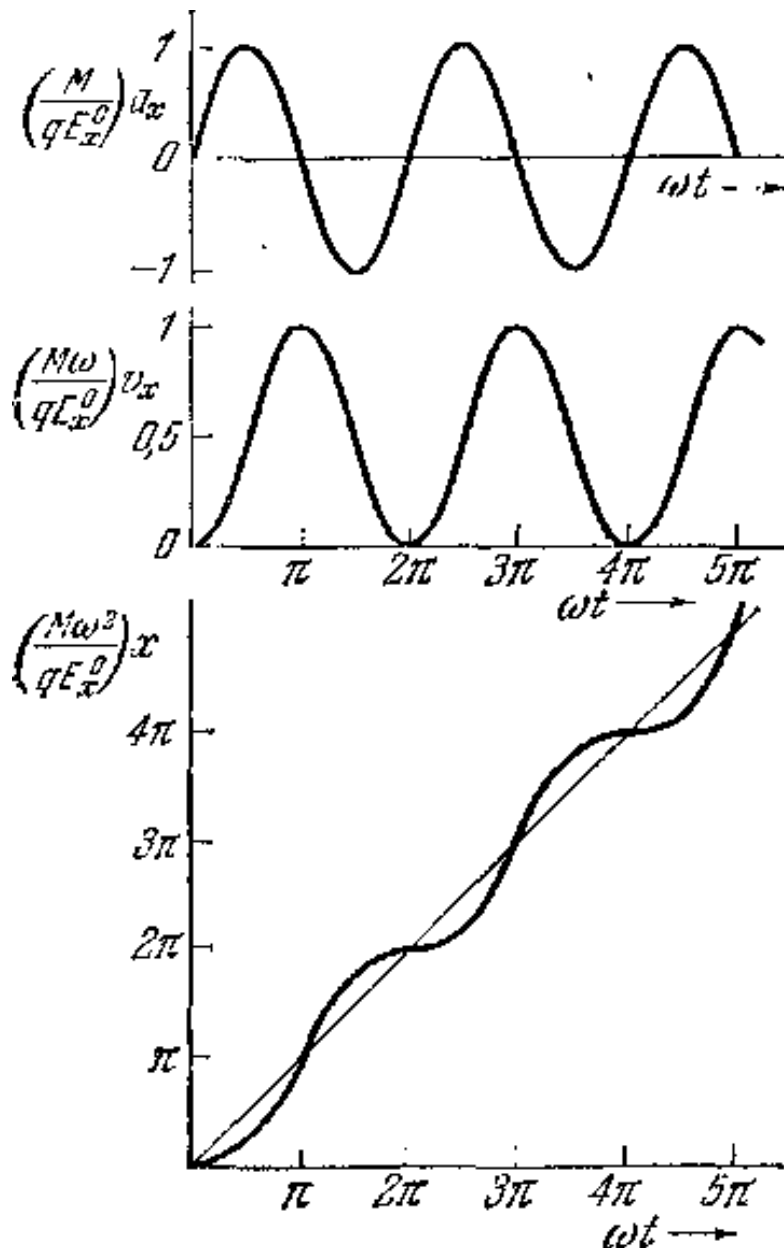


Рисунок 62 - Графики зависимости координаты, скорости и ускорения частицы, движущейся в переменном электрическом поле

2.3.2 Частица в магнитном поле

Уравнение движения частицы, имеющей массу m и заряд q , движущегося со скоростью $\vec{v}$ в постоянном магнитном поле с индукцией $\vec{B}$, имеет следующий вид:

$$m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = q \vec{v} \times \vec{B} \quad (95)$$

где $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$ - сила, действующая на движущуюся частицу в магнитном поле, называемая силой Лоренца. Это векторное уравнение необходимо спроектировать на оси прямоугольной декартовой системы координат. Получим три скалярных уравнения.

Пусть вектор индукции магнитного поля направлен вдоль оси z :

$$\vec{B} = B\vec{z} \quad (96)$$

Отсюда, согласно правилу определения составляющих векторного произведения, следует:

$$\begin{aligned} [\vec{v}\vec{B}]_x &= v_y B, \\ [\vec{v}\vec{B}]_y &= -v_x B, \\ [\vec{v}\vec{B}]_z &= 0 \end{aligned} \quad (97)$$

Таким образом, уравнение (51) приводится к системе дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{d^2x}{dt^2} &= \frac{q}{m} v_y B, \\ \frac{d^2y}{dt^2} &= -\frac{q}{m} v_x B, \\ \frac{d^2z}{dt^2} &= 0 \end{aligned} \quad (98)$$

Эту систему также можно записать в виде:

$$\begin{aligned} \dot{v}_x &= \frac{q}{m} v_y B, \\ \dot{v}_y &= -\frac{q}{m} v_x B, \\ \dot{v}_z &= 0 \end{aligned} \quad (99)$$

Отсюда видно, что остаётся постоянной составляющая скорости, параллельная оси z , т.е. вдоль которой направлено магнитное поле.

Можно также непосредственно обнаружить и другую особенность данного движения: остаётся также постоянной кинетическая энергия

$$T = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m\vec{V} \cdot \vec{V} \quad (100)$$

Так как

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{2}m \left(\vec{V} \cdot \vec{V} + \vec{V} \cdot \vec{V} \right) = m\vec{V} \cdot \vec{V} = m\vec{V} \cdot \left(\frac{q}{m} \vec{V} \times \vec{B} \right) \equiv 0 \quad (101)$$

Потому что векторное произведение $\vec{V} \times \vec{B}$ перпендикулярно к вектору скорости. Следовательно, магнитное поле не изменяет кинетическую энергию свободной частицы. Из постоянства кинетической энергии мы делаем вывод, что величина $|\vec{V}|$ также постоянна. Этот результат наводит на мысль искать решение выражающее равномерное круговое движение, при котором составляющие скорости по осям x и y изменяются по синусоидальному закону с разностью фаз $\pi/2$.

Решение системы уравнений движения (99) будем искать в следующем виде:

$$\begin{aligned} v_x &= v_1 \cos \omega t, \\ v_y &= -v_1 \sin \omega t, \\ v_z &= c \end{aligned} \quad (102)$$

Это – уравнения кругового движения. Из них следует:

$$\begin{aligned} \frac{dv_x}{dt} &= -\omega v_1 \sin \omega t, \\ \frac{dv_y}{dt} &= -\omega v_1 \cos \omega t, \end{aligned} \quad (103)$$

И после подстановки решений (3) система уравнений принимает вид:

$$\begin{aligned} \omega v_1 \cos \omega t &= \frac{q}{m} B v_1 \cos \omega t, \\ -\omega v_1 \sin \omega t &= -\frac{q}{m} B v_1 \sin \omega t \end{aligned} \quad (104)$$

Эти уравнения тождественно выполняются при условии, что:

$$\omega = \frac{q}{m} B = \omega_{\text{ц}}, \quad (105)$$

А этим соотношением определяется так называемая циклотронная (гироскопическая, ларморовская) частота, т.е. частота движения заряженной частицы в магнитном поле. Уравнения (104) удовлетворяются при любом значении v_1 .

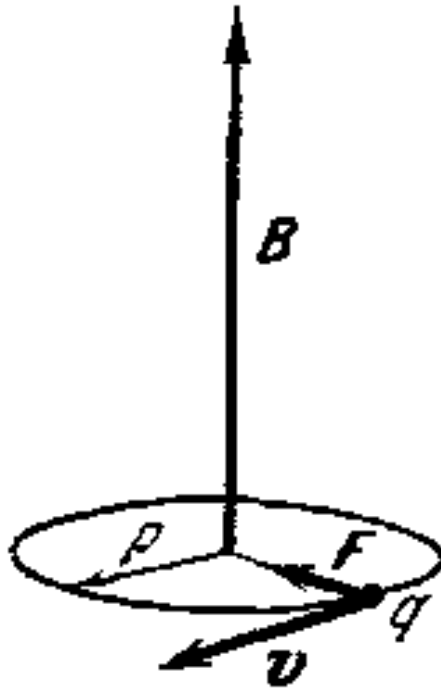


Рисунок 63 - Положительный заряд q , движущийся с начальной скоростью v , перпендикулярной к индукции B однородного магнитного поля, описывает окружность радиусом $\rho = \frac{mv_1}{qB}$ с постоянной по абсолютной величине скоростью V

Уравнение для циклотронной частоты можно получить и элементарным способом. Направленная внутрь траектории частицы магнитная сила $q\vec{v} \times \vec{B}$ создаёт центростремительное (направленное внутрь) ускорение, необходимое для кругового движения этой частицы (см. рисунок 63). Величина центростремительного ускорения равна $\frac{v_1^2}{r}$ или $\omega_{\text{ц}}^2 r$. Следовательно,

$$\frac{qB}{m} v_1 = m\omega_{\text{ц}}^2 r, \quad (106)$$

или

$$qBv_1 = m\omega_{\text{ц}}^2 r \quad (107)$$

Откуда получаем

$$\omega_{\text{ц}} = \frac{q}{m} B \quad (108)$$

Найдём уравнение траектории частицы в магнитном поле. Изменение положения частицы в зависимости от времени можно определить, интегрируя уравнения движения (102), положив в них ω равным $\omega_{\text{ц}}$:

$$\begin{aligned}
x &= x_0 - \rho \cos \omega_{\text{ц}} t = x_0 - \frac{v_1}{\omega_{\text{ц}}} \cos \omega_{\text{ц}} t \\
y &= y_0 - \rho \sin \omega_{\text{ц}} t = y_0 - \frac{v_1}{\omega_{\text{ц}}} \sin \omega_{\text{ц}} t \\
z &= z_0 + v_z t
\end{aligned}
\tag{109}$$

Отсюда видно, что проекция траектории частицы на плоскость xy представляет собой окружность с центром в точке x_0, y_0 . Радиус этой окружности равен

$$\rho = \frac{v_1}{\omega_{\text{ц}}} = \frac{mv_1}{qB}.$$
(110)

Этот радиус называется гироскопическим радиусом или циклотронным (ларморовским) радиусом.

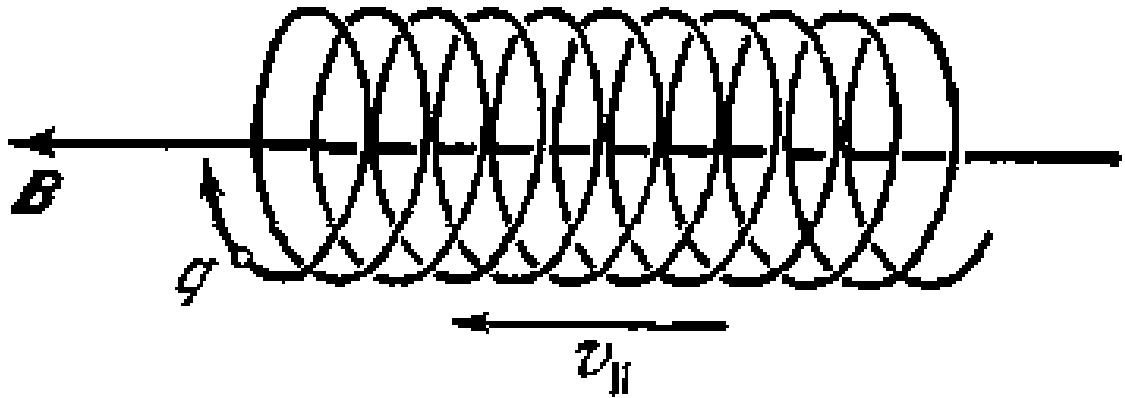


Рисунок 64 - Положительный заряд q описывает в однородном магнитном поле с индукцией B спираль с постоянным шагом. При этом параллельная вектору B составляющая скорости заряда, остается постоянной

Траектория частицы представляет собой спираль (см. рисунок 64), ось которой направлена параллельно магнитной индукции; составляющая скорости частицы, параллельная вектору B , остаётся постоянной.

Заметим следующее

$$B\rho = \frac{mv_1}{q},$$
(111)

где mv_1 - импульс частицы в плоскости, перпендикулярной к $\vec{B}$. Это важное соотношение; выполняется и в релятивистской области скоростей, если вместо mv_1 подставить в него релятивистский импульс. Поэтому можно применять это соотношение для определения импульсов частиц с очень высокой энергией.

Рассмотрим примеры

1. Гироскопическая частота

Какова гироскопическая частота электрона в магнитном поле с индукцией 1,1 Тл (величина поля $10^{-15} \cdot 10^{-3}$ Тл типична для магнитных полей обычных электромагнитов с железным сердечником)? Согласно формуле для циклотронной частоты, имеем:

$$\omega_{\text{ц}} = \frac{q}{m} B = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 1,1 \cdot 10^{-3}}{9,11 \cdot 10^{-31}} = 1,9 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$$

Частотак периодического движения, равна:

$$f_{\text{ц}} = \frac{\omega_{\text{ц}}}{2\pi} = 3 \cdot 10^7 \text{ Гц}$$

Соответствующая длина электромагнитной волны в свободном пространстве равна:

$$\lambda_{\text{ц}} = \frac{1}{f_{\text{ц}}} = \frac{1}{3 \cdot 10^{10}} = 3,3 \cdot 10^{-8} \text{ м}$$

Гироскопическая частота протона относится к гироскопической частоте электрона в том же самом магнитном поле так же, как масса элетрона к массе протона (1836 раз):

$$\omega_{\text{ц}}(\text{p}) = \frac{1,9 \cdot 10^8}{1836} = 10^5 \text{ с}^{-1}$$

Направление кругового движения электрона в магнитном поле противоположно направлению движения протона, потому чт их заряды имеют противоположные знаки.

2. Гироскопический радиус

Каков радиус траектории электрона, движущегося в циклотроне со скоростью 10^6 м/с в плоскости, перпендикулярной к вектору магнитной индукции В, величина которого равна 1,1 Тл (см. рисунок 65)?

Применяя уравнение $\rho = \frac{v_1}{\omega_{\text{ц}}} = \frac{mv_1}{qB}$, найдём:

$$\rho = \frac{v_1}{\omega_{\text{ц}}} = \frac{10^6}{1,9 \cdot 10^8} = 5,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Гироскопический радиус протона, движущегося с той же скоростью, больше в Мр/м раз:

$$\rho = 0,0052 \cdot 1836 = 9,66 \text{ м}$$

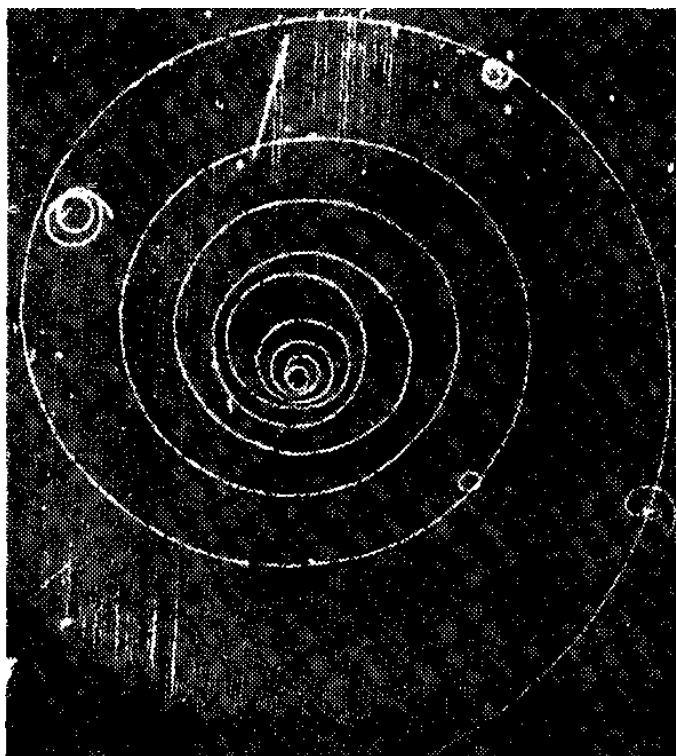


Рисунок 65 - Полученная в водородной пузырьковой камере фотография траектории электрона, движущегося с большой скоростью в магнитном поле. Электрон входит в поле зрения внизу слева. Теряя свою энергию на ионизацию водородных молекул, электрон замедляет движение. Когда уменьшается скорость электрона, уменьшается и радиус кривизны его траектории в магнитном поле. Поэтому траектория имеет форму спирали

Рассмотрим случай, когда скорость частицы направлена под углом к магнитному полю. Представим скорость $\vec{v}$ в виде $\vec{v} = \vec{v}_{\parallel} + \vec{v}_{\perp}$, где $\vec{v}_{\parallel}$ - скорость вдоль поля, а $\vec{v}_{\perp}$ - перпендикулярно к нему. Движения с этими скоростями независимы. Первое есть равномерное прямолинейное движение вдоль поля со скоростью $\vec{v}_{\parallel}$, второе – равномерное движение по окружности вокруг поля с угловой частотой, равное гироскопической. Радиус этой окружности равен $\rho = \frac{v_{\perp}}{\omega_{\text{ц}}}$. В результате сложение обоих движений возникает движение по спирали, ось которой параллельна магнитному полю.

2.3.3 Масс-спектрометрия

Если абстрагироваться от конкретных задач, то масс-спектрометрию можно рассматривать и как самоорганизующуюся систему, преобразующую вещество и информацию в новую информацию о веществе, его составе, свойствах и происходящих с ним процессах.

Процесс преобразования вещества в ионы можно характеризовать следующими особенностями:

1. Ионы имеются в плазме и могут быть сравнительно легко получены из газообразных и конденсированных веществ (жидкостей и твердых тел).

2. Для получения ионов применяются: элементарные процессы (соударение различных частиц; воздействие радиации, электромагнитных квантов и электрических полей) и коллективные процессы (высокие температуры, лазерные импульсы, газовые разряды, распыление вещества).
3. Ионы могут возникать при различных энергетических воздействиях частиц и излучений - от минимально возможных до высоких энергий (кэВ, МэВ, ГэВ). Минимальная энергия для появления положительных ионов - потенциал (энергия) ионизации, а отрицательные ионы могут возникать почти при нулевой энергии электронов.
4. В зависимости от характера воздействия на вещество различают мягкую и жесткую ионизации. При мягкой ионизации, как правило, сохраняется структура молекул; получаются ионы с малой энергией, преимущественно однозарядные; при этом наблюдается простой масс-спектр. При жесткой ионизации может происходить самая разнообразная трансформация структуры молекул, и даже их полное разрушение; ионы диссоциируют и могут иметь большой энергетический разброс.
5. В последующем трансформация и возникновение новых ионов происходят при ион-молекулярных реакциях первичных ионов с имеющимися в источнике газообразными веществами.

В результате всех этих процессов от одного соединения наблюдаются довольно сложные масс-спектры. В них могут разнообразными способами образовываться различные ионы: положительные и отрицательные; одно и многозарядные; атомарные, молекулярные и кластерные; первичные, диссоциированные, перезарядные ионы и ионы от ион-молекулярных реакций.

Кроме того, масс-спектры существенно усложняются из-за многоатомности и многоэлементности анализируемого соединения или вещества, многоизотопности входящих в него элементов и наличия в пробе нескольких соединений.

Всё это приводит не только к тому, что спектр одного соединения может быть представлен несколькими пиками на различных массовых числах (тем более для пробы из нескольких соединений), но и к появлению мультиплетов на различных массовых числах.

Дополнительно к этому можно отметить, что эффективность ионизации и регистрации ионов для разных элементов и соединений не одинаковы и зависят от их способов и условий. Это важные факторы, влияющие на результаты масс-спектрометрических исследований.

Разделение по массе особенно явно проявляется при движении сформированных пучков ионов в четко ограниченных электрических и магнитных полях, которые имеются во многих масс-спектрометрах. Отметим, что разделение частиц по массам имеет гораздо более универсальный характер и наблюдается, хотя и с несколько меньшими эффектами, во многих природных

и техногенных явлениях, что, в частности, находит применение в процессах идентификации источников происхождения веществ.

Разделение ионов по массе (точнее, отношению массы к заряду) в различных электрических и магнитных полях имеют свои особенности:

1. В стационарных поперечных магнитных полях частицы сортируются по импульсам, в стационарных поперечных электрических полях - по энергии, а в специально подобранных разделенных и совместных электрических и магнитных полях могут сортироваться по массе иона.
2. Для разделения ионов по массам в секторных масс-спектрометрах с двойной фокусировкой применяются самые разнообразные комбинации магнитных и электрических полей. При этом могут варьироваться типы электрических и магнитных секторов, а также последовательность их расположения.
3. Сортировка по массам происходит также в комбинации постоянных и переменных электрических квадрупольных полей (квадрупольные масс-спектрометры и ионные ловушки).
4. Во времяпролетных масс-спектрометрах ионы сортируются по скорости при движении в свободном пространстве, что для частиц с одинаковой энергией ведет к сортировке по массе. В масс-спектрометрах того же вида при добавлении поперечных магнитных или электрических полей, использовании отражения ионов в продольных электрических полях может происходить сортировка ионов, имеющих некоторый разброс по энергии, прямо по их массам.

У различных типов масс-спектрометров сильно отличаются требования к формированию пучков ионов:

- квадрупольные масс-спектрометры и ионные ловушки не имеют жестких требований к входным пучкам ионов (по координатам, направлениям и энергии);

- ординарные времяпролетные масс-спектрометры с прямолинейной траекторией требуют формирования пучков ионов по времени (короткие импульсы) и энергии. В рефлектронах требования к допустимому разбросу по энергии ионов могут быть значительно ниже;

- секторные магнитные масс-спектрометры требуют жесткого формирования пучков ионов по координатам, направлениям и энергии.

В большинстве перечисленных типов масс-спектрометров используют ионы, имеющие энергию от нескольких эВ до десятков кэВ. Широко распространенные квадрупольные масс-спектрометры и ионные ловушки могут обеспечить хорошую сортировку ионов по массам для их пучков, практически не сформированных по энергиям, координатам и направлениям, причем для ионов малой энергии.

Имеет значение и длина пути ионов в масс-спектрометре, кратность воздействия анализирующих полей на ионы. Длинная траектория может приводить к увеличению возможности рассеяния ионов, требует увеличения габаритов и веса приборов. Колебательные или многократно повторяемые траектории позволяют заметно увеличить разрешающую способность масс-

спектрометров. Особенно это заметно в квадрупольных масс-спектрометрах, в магнитно-резонансных масс-спектрометрах (с Фурье преобразованием и без него) и в ионных ловушках.

По общему характеру взаимодействия ионов с электрическими и магнитными полями в масс-спектрометрах можно отметить следующее:

1. Обычно в секторных магнитных масс-спектрометрах используется однократное воздействие магнитных и электрических полей на пролетающие внутри сектора ионы (кроме секторов имеются ещё и плечи фокусировок).
2. В квадрупольных масс-спектрометрах имеет место более длительное действие электрического поля на протяжении всего процесса сепарации по массам. В итоге получающегося поступательного и колебательного движения ионов через квадрупольный масс-анализатор проходят ионы только определенной массы.
3. Для разделения ионов по массе, долговременного накопления и "хранения" ионов определенных масс могут использоваться разнообразные типы ионных ловушек (квадрупольные и с ион циклотронным резонансом).
4. Своеобразным является получение и регистрация спектров масс в масс-спектрометрах с Фурье преобразующим ион циклотронным резонансом.
5. В ординарных прямолинейных времяпролетных масс-спектрометрах на сформированные в источнике импульсные пучки ионов воздействие полей вообще отсутствует.
6. Отражение ионов электрическим полем во времяпролетных масс-спектрометрах - рефлектронах существенно улучшают характеристики такого вида масс-спектрометров (в настоящее время занимающих второе место по распространенности и частоте применений!).

Регистрация ионных токов определяется условиями ионизации и разделения ионов по массе, требованиями к точности и/или чувствительности измерений. В одних случаях требуется быстрая регистрация, в других одновременная для всех образовавшихся ионов, в-третьих, длительная и т.д. Поэтому для масс-спектрометров разработаны и применяются несколько способов измерения ионных токов: усилители постоянного тока (УПТ), АЦП сигнала электрометрического усилителя, счет ионов, почернение эмульсии фотопластинки. И устройства детектирования ионов: однолучевые приемники ионов, многолучевые приемники ионов, цилиндр Фарадея, вторичные электронные умножители, ионно-электронные преобразователи, микроканальные пластины, ионно-чувствительные пластинки (фотопластинки).

Способы регистрации положительных и отрицательных ионов в некоторых случаях могут иметь свои особенности.

Рабочий арсенал масс-спектрометрии чрезвычайно богат различными приборами, которые могут использоваться для решения широкого круга задач. В таблице 1 перечислены основные узлы, применяемые в масс-спектрометрах, и классификация масс-спектрометров по агрегатному состоянию анализируемых веществ и по виду анализов. Конечно же, она, как и любая

другая классификация, не может быть всеобъемлющей, но позволяет получить представление о назначении масс-спектрометрии, её методах и инструментарии.

Как и в ряде естественных наук (например, в химии, где широко используется квантовая механика), роль и значение специфичной собственной теории масс-спектрометрии сравнительно невелики. Тем не менее, можно отметить следующие специализированные (специфические) для масс-спектрометрии теоретические вопросы:

1. В результате длительной и кропотливой работы более или менее детально разработаны вопросы разделения и фокусировки ионов в статических электрических и магнитных полях различной конфигурации, в том числе и с учетом краевых и рассеянных полей.
2. Предложено довольно много расчетно-обоснованных систем с электрическими и магнитными полями и без них (в частности времяпролетные приборы).
3. С середины прошлого века ведется работа по анализу разделения ионов в квадрупольных полях (квадрупольные масс-фильтры, ионные ловушки) и при этом открываются новые черты и особенности этих процессов.
4. Большое значение имеет моделирование работы масс-спектрометра как единого целого (источник ионов, масс-анализатор, детектор ионов) при вариации параметров масс-анализатора и пучков ионов.
5. Масс-спектрометры требуют расчета и/или оценки допусков на основные геометрические и электрические параметры и не могут обойтись без системы юстировки. Обоснование этих моментов составляет важную часть теоретической работы.
6. Несколько последних десятилетий большое внимание уделяется анализу работы различных tandemных масс-спектрометров, способов уменьшения фонов в масс-спектрах.
7. На протяжении длительного времени делаются попытки построения моделей ионизации вещества в источниках с электронной бомбардировкой, поверхностной ионизацией, искровой и лазерной ионизацией, вторичной ионной эмиссией, ионизацией электрическим полем, а также уточняются различные аспекты ионизации в газовых разрядах.
8. Теоретический анализ применялся также для анализа и совершенствования работы детекторов ионов с использованием вторичных процессов.
9. Обработка результатов масс-спектрометрических измерений имеет немало специфичных черт и неразрывно связана с вычислительной техникой, математической статистикой и теорией ошибок.
10. Практически любой масс-спектрометр (за исключением гелиевого течеискателя) предназначен для регистрации нескольких ионных пиков различных масс. Достижение возможно больших абсолютной и

относительной чувствительности и возможно лучшей точности при регистрации масс-спектров также требует теоретической проработки.

Другие многочисленные теоретические вопросы, с которыми имеет дело масс-спектрометрия, относятся к сложным теоретическим представлениям ядерной, атомной, молекулярной физики, физики твердого тела и жидкостей, физики плазмы и элементарных процессов в ней, радиационных процессов. Вся эта информация "приспосабливается" к специфичным особенностям масс-спектрометрии. Основные теоретические представления, как правило, развивались в связи с общим познанием строения вещества и насущными требованиями практической масс-спектрометрии по развитию и объяснению результатов анализов. Успехи и прогресс масс-спектрометрии во многом обусловлены единством и тесной связью теоретических работ с опытно-конструкторскими разработками.

Физико-химические процессы, происходящие в масс-спектрометрах, довольно разнообразны. Масс-спектрометры могут использоваться для изучения взаимодействия ионов с веществом, находящимся как в обычном, так и в возбужденном состоянии. Через фиксацию появления ионов в этих процессах, определение их энергетических характеристик и периодов полураспада масс-спектрометр представляет наилучшее средство для изучения ион-молекулярных реакций, а также взаимодействия ионов с возбужденными атомами, молекулами и свободными радикалами. Частично эти вторичные процессы взаимодействия ионов используются для аналитических целей в широко распространенных источниках ионов с химической ионизацией и в современных тандемных масс-спектрометрах.

С помощью масс-спектрометрии, используя изменение содержания ионов различных масс (часто при вариации условий ионизации), может быть получена важная информация о структуре атомных ядер, атомов, молекул и более крупных образований:

- через массу, состав, характер диссоциации и содержание различных ионов масс-спектрометрия дает ряд ценных данных, как о химических, так и более слабых ван-дер-ваальсовых силах (все эти силы обусловлены электромагнитными взаимодействиями);
- через достаточно точное определение массы иона масс-спектрометрия позволяет судить об его элементном составе;
- через энергию, затраченную на создание определенных молекулярных ионов можно получить информацию об энергии связи внешних электронов;
- через распространенность различных диссоциированных ионов - информация о структуре молекул;
- через энергию осколочных ионов - информация о структуре орбиталей;
- через метастабильные ионы - информация о времени жизни возбужденных состояний;
- через точные массы и содержание изотопов - информация о свойствах атомных ядер.

В масс-спектрометрии отрицательных ионов кроме интенсивности и массы иона используют еще третью "координату" - величину энергии

электронов, при ионизации вещества путем резонансного захвата электронов, что позволяет получать дополнительную информацию о структуре и других особенностях молекулы или её фрагментов.

Уместно отметить и то, что многие отрицательные ионы имеют ограниченное время жизни, что обусловлено процессом автоотщепления добавочного электрона. Это в свою очередь позволяет наблюдать масс-спектр нейтральных молекул, образовавшихся из разделенных ионов. А также измерять время жизни отрицательных ионов, характеризующее характер колебательного возбуждения молекулы или её фрагмента.

Нельзя не упомянуть зондовые методы масс-спектрометрии, позволяющие определять распределение элементов и изотопов в веществе (в частности, различных конструкционных материалах, полупроводниковых структурах, минералах, других геологических образцах и т.д.) по его поверхности и глубине с высоким пространственным разрешением.

Таким образом, масс-спектрометрические методы и оборудование используются при исследовании:

- вещества в ионизованном состоянии;
- атомных и молекулярных масс;
- изотопного состава и их вариаций;
- высокомолекулярных соединений;
- взаимодействия ионов с веществом;
- элементного и изотопного состава и структуры молекул и т.д.

Большие принципиальные возможности масс-спектрометрии появляются при сочетании её с другими методами. Сочетание методов значительно расширяет возможности каждого из них, позволяя получать больше информации об объекте исследования. Оказалось полезным двукратное, трехкратное, четырехкратное и т.д. разделение по массам в тандемных масс-спектрометрах. В таком приборе имеет место "очищение" масс-спектра благодаря дискриминации различных помех (от рассеяния ионов на остаточных газах, на стенках камеры и различных эффектов столкновения и перезарядки). Весьма эффективными, как для хроматографии, так и для масс-спектрометрии, оказались хромато-масс-спектрометры - одни из наиболее распространенных современных аналитических приборов. В них различные типы газовых, жидкостных или ионных хроматографов (электрофореза) обеспечивают предварительное разделение вещества, а индикацию разделенных веществ и измерение их содержаний осуществляет масс-спектрометр. Поэтому масс-спектрометры в хромато-масс-спектрометрах большей частью имеют дело не со смесью соединений, а с индивидуальными соединениями, на короткое время поступающими в источник ионов. Очень полезной оказалась возможность практически одновременного (или попеременного) наблюдения массовых пиков с помощью масс-спектрометра и электромагнитного излучения - эмиссионным спектрометром. В таких "комплексных" приборах регистрируется электромагнитное излучение из масс-спектрометрических источников ионов с газовым разрядом (с индуктивно-связанной плазмой, тлеющим разрядом, искровым, дуговым, коронным). Весьма плодотворным, но далеко не в полной

мере реализованным, оказалось совместное применение лазеров и масс-спектрометрии, которое может идти по двум - трем направлениям: применение лазеров в масс-спектрометрии, применение масс-спектрометрии для диагностики и изучения работы лазеров, масс-спектрометрический контроль работы установок по лазерному разделению изотопов. Некоторые методы физико-химического анализа применяют одинаковые узлы или схожи по ряду моментов действия. Например, источники с индуктивно связанной плазмой используются и в масс-спектрометрии, и в оптической эмиссионной спектроскопии, а "электронный зонд", дающий локальное рентгеновское излучение элементов в рентгено-флуоресцентном анализе, идейно и частично конструктивно схож с "ионным зондом" вторичной ионной масс-спектрометрии. В современных аналитических средствах весьма высок уровень интеграции различных элементов, блоков, устройств (система подачи проб, различные стабилизаторы напряжений и токов, операционные усилители, средства вычислительной техники и программного обеспечения, стандартные образцы).

Более распространенным и относительно простым является применение масс-спектрометрии в аналитических целях. Условия ионизации в этих случаях, как правило, либо остаются неизменными, либо контролируемым образом переключаются между несколькими значениями.

Масс-спектрометрия - как область аналитических измерений, требует довольно сложных приборов, основательного методического и метрологического обеспечения. Она объединяет и согласует длинную цепочку объектов, методов и процессов:

- объект исследования;
- подготовку эталонов, изотопных или элементных меток, поверочных смесей или образцов сравнения,
- метод отбора и подготовки проб;
- ионизацию вводимого вещества;
- разделение ионов по массам;
- их детектирование;
- обработку и представление полученной информации;
- её анализ и последующие выводы;

Работы по осуществлению этой цепочки требуют использования разнообразных систем и узлов масс-спектрометров.

Эти методы обладают хорошей наглядностью, большой универсальностью и информативностью, позволяют достигать высокой чувствительности, разрешающей способности и точности, что способствует их широкому распространению в различных отраслях науки и технологии:

- ядерная физика и ядерные технологии
- химия и химические технологии
- лазерные технологии
- полупроводниковые технологии
- вакуумные технологии
- материаловедение

- геохимия и космохимия
- биология и биохимия
- экология
- медицина
- фармакология
- криминалистика и т.д.

2.3.4 Электромагнитные колебания

Простейшей колебательной системой в механике является груз, подвешенный на пружине, движущийся без трения (см. рисунок 66). При этом мы предполагаем, что массой пружины можно пренебречь по сравнению с массой груза и что вся упругость заключена в пружине (так называемая система с сосредоточенными массой и упругостью). При выведении груза из положения равновесия, он будет совершать гармонические колебания, при которых смещение из положения равновесия изменяется со временем по закону синуса (или косинуса).

Когда груз находится в крайних положениях (а и в см. рисунок 66), кинетическая энергия груза равна нулю, но потенциальная энергия пружины достигает максимума (т.к. потенциальная энергия растянутой пружины пропорциональна удлинению $E_{\text{п}} = \frac{kx^2}{2}$). При прохождении грузом положения равновесия (б и г, см. рисунок 66), напротив, кинетическая энергия груза имеет наибольшее значение, а потенциальная энергия пружины, которая в этом положении ни сжата, ни растянута, равна нулю.

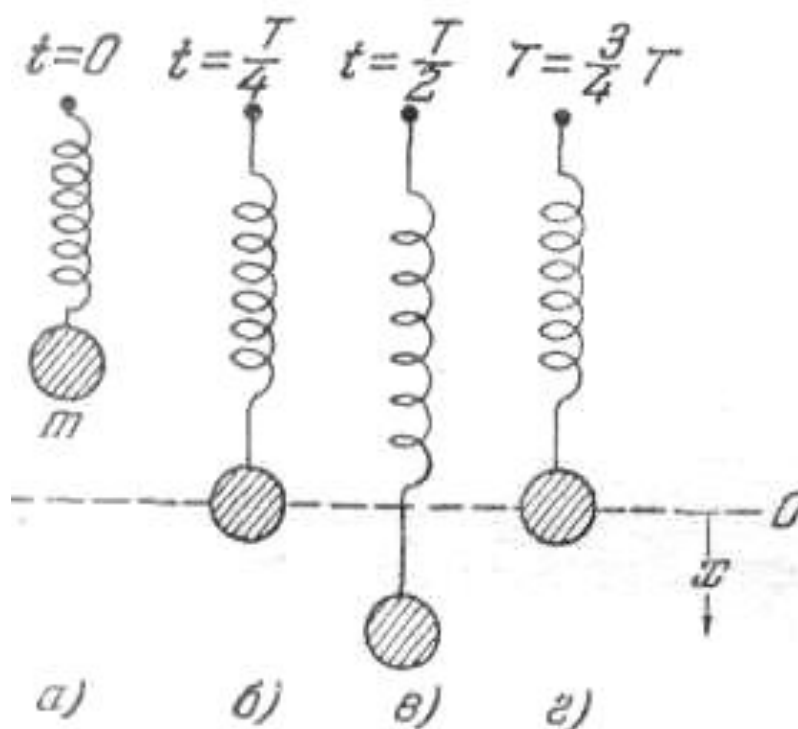


Рисунок 66 - Механические колебания с сосредоточенными массой и упругостью

Поэтому рассматриваемые механические колебания есть периодическое превращение энергии системы из кинетической в потенциальную и обратно. При этом полный запас энергии, т.е. сумма кинетической и потенциальной энергии, остаётся постоянным (в идеализированном случае незатухающих колебаний, которые мы и рассматриваем). При затухании часть энергии расходуется на трение и колебания постепенно затухают и прекращаются совсем.

Аналогичные процессы мы имеем при электрических колебаниях. Простейший электрический колебательный контур состоит из конденсатора и индуктивности, соединенных между собой (см. рисунок 67). Будем считать, что емкость между витками катушки весьма мала по сравнению с емкостью конденсатора, а индуктивность конденсатора и соединительных проводов мала сравнительно с индуктивностью катушки (контур с сосредоточенными емкостью и индуктивностью или закрытый колебательный контур). Контур, не обладающий сопротивлением, называется идеальным. В таком контуре электромагнитные колебания будут незатухающими, т.е. продолжаться сколь угодно долго. Напротив, если контур будет обладать сопротивлением, которое обычно эквивалентно изображается включением в цепь резистора, то контур будет реальным, а колебания затухающими. Рассмотрим последовательно собственные (незатухающие), а затем затухающие электромагнитные колебания.

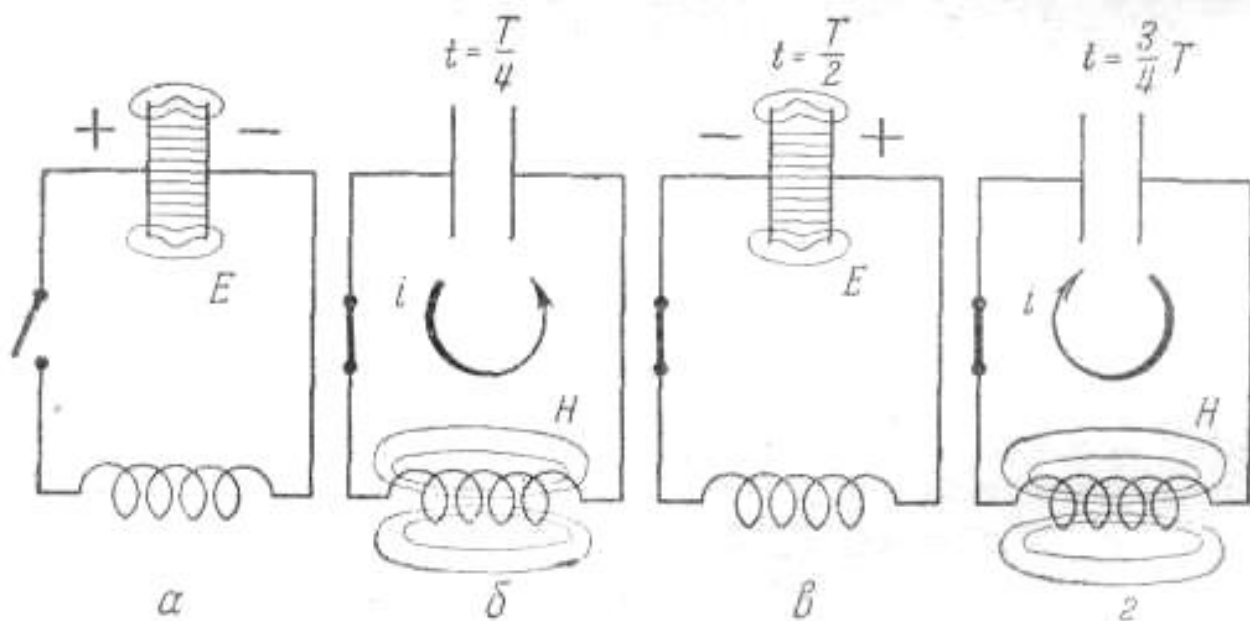


Рисунок 67 - Электрические колебания с сосредоточенными индуктивностью и емкостью

Предположим, что мы, разомкнув контур, зарядили конденсатор от стороннего источника энергии. Между пластинами конденсатора появится электрическое поле, которое будет заключать в себе определенную энергию

(см. рисунок 67, а), равную $E = \frac{CU^2}{2}$. Замкнем теперь конденсатор на индуктивность. Конденсатор начнет разряжаться и его электрическое поле будет уменьшаться. При этом в контуре возникнет электрический ток разряда конденсатора, отчего в катушке индуктивности появится магнитное поле. Через некоторое время, равное четверти периода колебания, конденсатор разрядится полностью и электрическое поле исчезнет вовсе. Но магнитное поле при этом достигнет максимума, а следовательно, энергия электрического поля превратится в энергию магнитного поля, равную $E = \frac{LI^2}{2}$.

В дальнейшие моменты времени магнитное поле будет исчезать, так как не имеется токов, его поддерживающих. Это исчезающее поле вызовет экстраток самоиндукции, который в соответствии с законом Ленца будет стремиться поддержать ток разряда конденсатора и будет, следовательно, направлен так же, как и этот последний. Поэтому конденсатор будет перезаряжаться и между его пластинами появится электрическое поле противоположного направления. Через время, равное половине периода колебания, магнитное поле исчезнет вовсе, а электрическое поле достигнет максимума, и энергия магнитного поля вновь превратится в энергию электрического поля. В дальнейшем конденсатор будет снова разряжаться, и в контуре возникнет ток, направленный противоположно току в предыдущей стадии процесса. Через время $3/4T$ конденсатор вновь окажется разряженным, а энергия электрического поля снова превратится в энергию магнитного поля (см. рисунок 67, г), и т. д. Через промежутки времени, равные полному периоду колебания T , электрическое состояние контура будет таким же, как и в начале колебаний (см. рисунок 67, а).

Если сопротивление контура равно нулю, то указанный процесс периодического превращения электрической энергии в магнитную и обратно будет продолжаться неограниченно долго, и мы получим незатухающие электрические колебания. Электрические колебания, происходящие под действием процессов в самом колебательном контуре, получили название собственных электрических колебаний. Рассмотренные выше колебания являются, очевидно, собственными.

Рассмотрим теперь количественно собственные колебания в контуре с сосредоточенными постоянными.

Будем считать, что электрические процессы в контуре квазистационарны. Это значит, что мгновенное значение силы тока I (будем обозначать её обычной большой буквой I , опуская различные индексы, однако надо иметь в виду, что это относится к мгновенному значению силы тока) — одно и то же в любом месте контура и что к мгновенным значениям электрических величин можно применять законы Кирхгофа.

Условимся считать заряд конденсатора q положительным, если знаки зарядов на обкладках таковы, как показано на рисунке 68, а силу тока — положительной, если ток направлен против часовой стрелки.

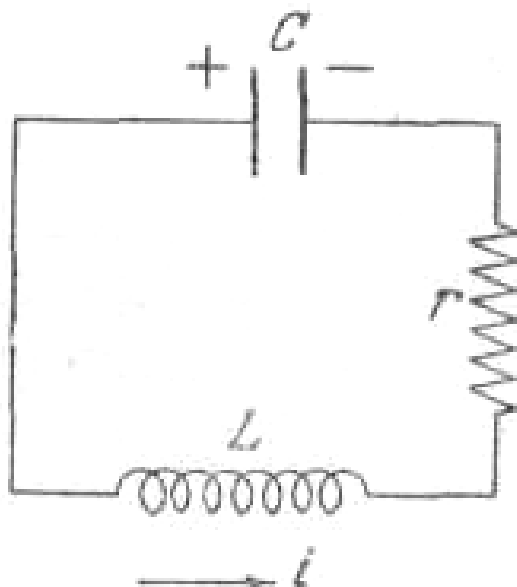


Рисунок 68 - К выводу уравнения электрических колебаний в контуре с сосредоточенными постоянными

Согласно второму закону Кирхгофа сумма падений напряжения в контуре равна сумме действующих в нем э. д. с. В нашем случае имеются два падения напряжения: на сопротивлении r , равное rI , и напряжение U_c на конденсаторе, которое противоположно по знаку падению rI . Кроме того, имеется э. д. с. самоиндукции, которая равна $-L \frac{dI}{dt}$. Поэтому

$$rI - U_c = -L \frac{dI}{dt} \quad (112)$$

Далее, напряжение на конденсаторе равно:

$$U_c = \frac{q}{C}, \quad (113)$$

а сила тока связана с зарядом конденсатора соотношением:

$$I = -\frac{dq}{dt} \quad (114)$$

Знак минус в последнем соотношении стоит потому, что выбранное положительное направление I соответствует уменьшению (положительного) заряда конденсатора.

Из этих трех уравнений можно исключить две из трех величин q , i , U и получить дифференциальное уравнение, связывающее лишь одну из них и время t . Подставим, например, выражения (113) и (114) в (112):

$$-\frac{dq}{dt}r - \frac{q}{C} = -\left(-\frac{dq}{dt}\right) \quad (115)$$

Сделав элементарные преобразования, получим уравнение в виде:

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + r \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = 0 \quad (116)$$

Разделим обе части этого уравнения на L и введем следующие обозначения:

$$\frac{r}{2L} = \alpha, \frac{1}{LC} = \omega_0^2 \quad (117)$$

Тогда окончательно:

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + 2\alpha \frac{dq}{dt} + \omega_0^2 q = 0 \quad (118)$$

или

$$\ddot{q} + 2\alpha \dot{q} + \omega_0^2 q = 0 \quad (119)$$

Это - линейное дифференциальное уравнение второго порядка с обыкновенными производными и с постоянными коэффициентами. Такое же точно уравнение можно получить для напряжения U и для силы тока I (в зависимости от того какую величину исключать из уравнений). Отметим, что колебания, описываемые линейными дифференциальными уравнениями, называются линейными колебаниями, а соответствующие колебательные системы — линейными системами.

Для того чтобы задача была определенной, необходимо еще задать начальные условия, которых, как известно, для уравнения второго порядка должно быть два. Положим, что мы начинаем отсчет времени с момента замыкания контура, и обозначим начальную величину заряда конденсатора через q_0 . Так как в начальный момент сила тока равна нулю, то начальные условия задачи таковы:

$$t = 0, q = q_0, \frac{dq}{dt} = 0 \quad (120)$$

Положим сначала, что сопротивление контура $r=0$. Тогда уравнение колебаний (119) принимает более простой вид:

$$\frac{d^2 q}{dt^2} + \omega_0^2 q = 0 \quad (121)$$

Общее решение этого уравнения есть гармоническое колебание:

$$q = A \cos(\omega_0 t + \varphi) \quad (122)$$

где постоянные A и φ (амплитуда и начальная фаза) могут иметь произвольные значения. В справедливости этого можно убедиться, подставляя

написанное решение в (121). Следовательно, имеем гармоническое колебание с частотой $\omega_0 = \sqrt{1/LC}$.

Постоянные A и φ определяются начальными условиями (120), Подставляя решение (122) в (120), имеем:

$$A \cos \varphi = q_0, A\omega_0 \sin \varphi = 0 \quad (123)$$

Это дает:

$$\varphi=0, A=q_0, \quad (124)$$

после чего решение (63) принимает следующий окончательный вид:

$$q = q_0 \cos \omega_0 t \quad (125)$$

Графическое изображение этого решения есть косинусоида, показанная на рисунке 70, а.

Из полученного решения (125) можно найти закон изменения напряжения на конденсаторе U_c :

$$U_c = \frac{q}{C} = \cos \omega_0 t \quad (126)$$

где $U_0=q_0/C$ есть амплитуда напряжения, равная начальному напряжению на конденсаторе. Сила тока в контуре равна

$$I = -\frac{dq}{dt} = q_0 \omega_0 \sin \omega_0 t = I_0 \sin \omega_0 t \quad (127)$$

где $i_0=q_0\omega_0$ — амплитуда тока. Сила тока, так же как и заряд, изменяется по гармоническому закону; однако, если заряд изменяется по закону косинуса, то сила тока — по закону синуса. Так как

$$\sin \omega_0 t = \cos \left(\omega_0 t - \frac{\pi}{2} \right), \quad (128)$$

то это значит, что между колебаниями заряда и силы тока существует разность фаз $\pi/2$, или 90° , причем колебания силы тока отстают по фазе на 90° (см. рисунок 69).

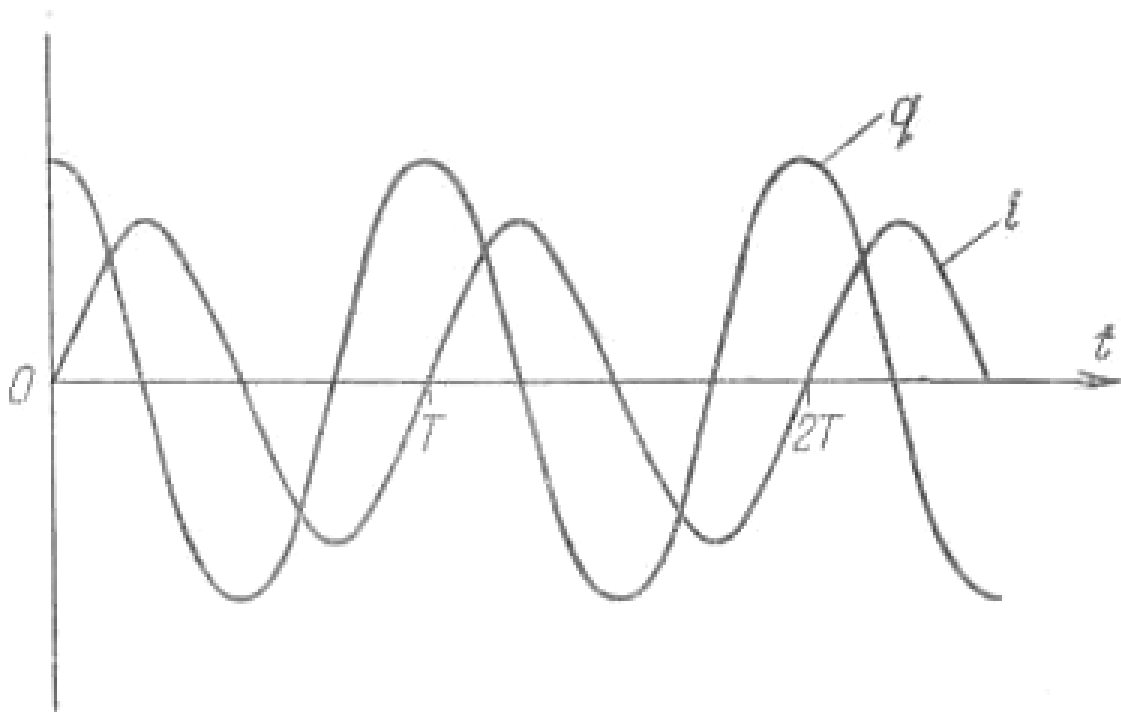


Рисунок 69 - Кривые колебаний заряда конденсатора и силы тока без затухания

Дифференциальное уравнение собственных колебаний в контуре можно получить также, исходя из закона сохранения энергии. Так как сопротивление отсутствует, то в любой момент времени сумма электрической энергии конденсатора и магнитной энергии катушки постоянна:

$$\frac{CU^2}{2} + \frac{LI^2}{2} = E = \text{const} \quad (129)$$

Учитывая, что $C = \frac{q}{U}$ перепишем выражение для энергии конденсатора в виде:

$$\frac{CU^2}{2} = \frac{C}{2} \left(\frac{q}{C} \right)^2 = \frac{1}{2C} q^2 \quad (130)$$

Так как $I = -\frac{dq}{dt}$, то можно записать

$$\frac{1}{2C} q^2 + \frac{L}{2} \left(-\frac{dq}{dt} \right)^2 = \text{const} \quad (131)$$

Продифференцируем это соотношение по времени

$$\frac{1}{2C} \cdot 2q \cdot \dot{q} + \frac{L}{2} \cdot 2\dot{q} \cdot \ddot{q} = 0 \quad (132)$$

Перепишем в виде

$$L\ddot{q} + \frac{1}{C}q = 0 \quad (133)$$

Деля на L и вводя обозначение

$$\frac{1}{LC} = \omega_0^2 \quad (134)$$

Получим уравнение, в точности совпадающее с уравнением (121):

$$\ddot{q} + \omega_0^2 q = 0 \quad (135)$$

В действительности сопротивление контура всегда не равно нулю. Вследствие этого энергия, первоначально запасенная в контуре, непрерывно расходуется на выделение тепла Ленца—Джоуля, так что интенсивность электрических колебаний постепенно уменьшается, и в конце концов колебания прекращаются вовсе (кривую типа б см. рисунок 70 - затухающие электрические колебания). Если увеличить сопротивление контура, то затухание колебаний увеличивается (кривая в).

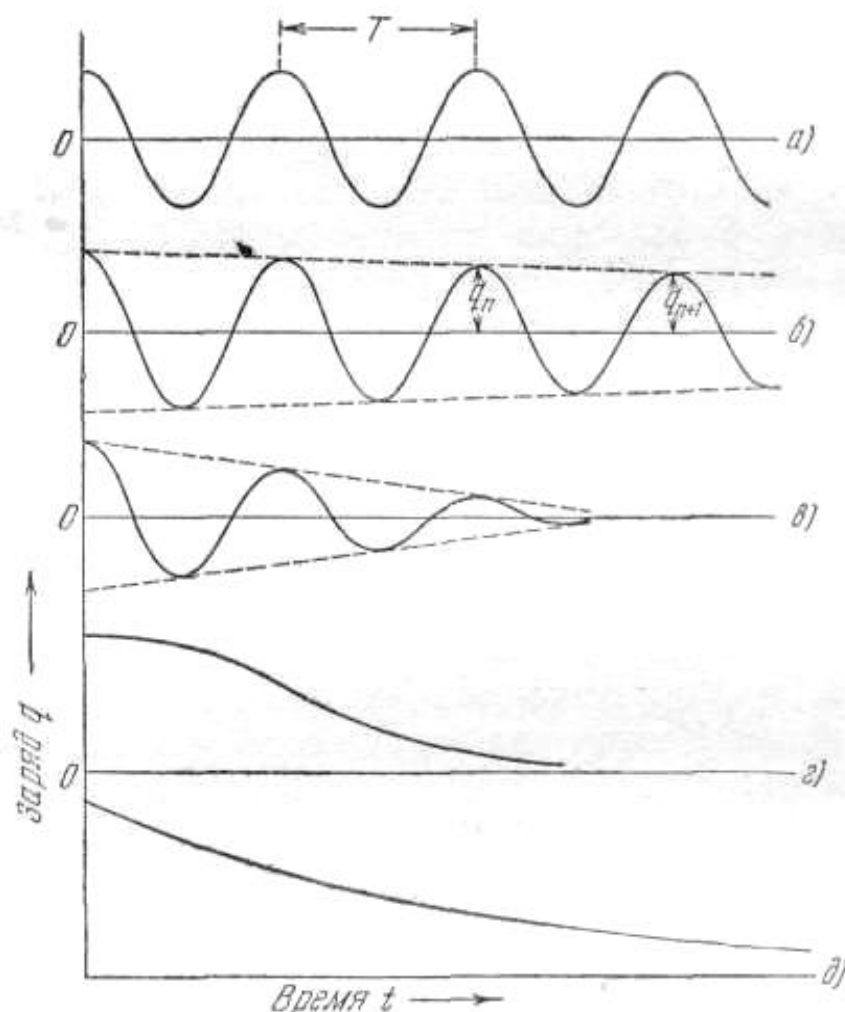


Рисунок 70 - Затухание электрических колебаний

В связи с изложенным отметим, что периодическими мы называем такие процессы, в которых изменяющиеся физические величины (например, электрический заряд q) через определенные промежутки времени (период колебания T) принимают одинаковые значения:

$$q(t + T) = q(t) \quad (136)$$

Так, например, гармонические колебания, изображаемые кривой а (см. рисунок 70), есть периодический процесс, имеющий совершенно определенный, конечный период T . Напротив, затухающие колебания, изображаемые кривыми б и в (см. рисунок 70), не имеют конечного периода ($T=\infty$) и поэтому, строго говоря, не являются периодическим процессом. Тем не менее, если затухание мало, небольшой отрезок кривых б и в (см. рисунок 70) можно приближенно рассматривать как отрезок соответствующей синусоиды и говорить о затухающих колебаниях как о гармонических колебаниях, амплитуда которых постепенно уменьшается.

Для количественной характеристики затухания пользуются тем, что отношение двух последовательных амплитуд q_n и q_{n+1} (см. рисунок 70, б) остается постоянным в течение всего процесса. Натуральный логарифм этого отношения

$$\delta = \ln \frac{q_n}{q_{n+1}} \quad (137)$$

принимают за меру затухания колебаний и называют логарифмическим декрементом затухания.

Если постепенно увеличивать сопротивление контура r , то затухание колебаний увеличивается и логарифмический декремент растет. Когда сопротивление превышает некоторое определенное для данного контура значение r_k , колебания не возникают вовсе и разряд описывается кривой г (см. рисунок 70). В этом случае заряд конденсатора уменьшается монотонно, сначала медленно, а затем с большей скоростью, и асимптотически стремится к нулю. При дальнейшем увеличении сопротивления эта кривая постепенно переходит в кривую д (см. рисунок 70).

Сопротивление r_k называется критическим сопротивлением контура. Оно зависит от величины емкости и индуктивности контура. Для возможности электрических колебаний, следовательно, необходимо, чтобы сопротивление контура r было меньше r_k . При $r > r_k$ мы имеем аperiodический разряд.

Отметим, что рассмотренные особенности разряда в электрическом колебательном контуре совершенно аналогичны особенностям механической колебательной системы, обладающей трением.

Рассмотрим теперь реальный контур, сопротивление которого не равно нулю. В этом случае колебания описываются полным дифференциальным уравнением (119). Решение этого уравнения имеет различный вид в зависимости от соотношения между коэффициентами. Положим сначала, что

$$\omega_0^2 > \alpha^2 \quad (138)$$

Тогда решение есть

$$q = Ae^{-\alpha t} \cos(\omega t + \varphi) \quad (139)$$

Здесь A и φ — по-прежнему постоянные, значения которых определяются начальными условиями, величина же ω равна

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} \quad (140)$$

В том, что (139) совместно с выражением (140) действительно является решением уравнения (115), проще всего можно убедиться, подставляя (139) в (119).

Полученное решение есть аналитическое выражение кривых затухающих колебаний q и в рисунке 70. Кривая в соответствии с рисунком 70 соответствует большему значению коэффициента α . Формулу (139) можно истолковать как гармоническое колебание с круговой частотой ω и с амплитудой

$$y = Ae^{-\alpha t}, \quad (141)$$

которая не остается постоянной, а непрерывно уменьшается с течением времени. Показатель α называется коэффициентом затухания колебаний.

Исследуем подробнее решение (139) и найдем прежде всего те моменты времени, в которые заряд q достигает максимумов и минимумов. Для этого, согласно правилу нахождения экстремумов, продифференцируем (139) и приравняем первую производную нулю. Это даст:

$$\frac{dq}{dt} = -A\alpha e^{-\alpha t} \cos(\omega t + \varphi) - A\omega \sin(\omega t + \varphi) = 0 \quad (142)$$

или

$$\tan(\omega t + \varphi) = -\frac{\alpha}{\omega} \quad (143)$$

Пусть $t=t_1$ есть какое-либо решение этого уравнения. Тогда его решениями будут также:

$$\begin{aligned} & \dots, t_1 - 2T, t_1 - T, t_1 + T, t_1 + 2T, \dots \\ & \dots, t_1 - \frac{3}{2}T, t_1 - \frac{T}{2}, t_1 + \frac{T}{2}, t_1 + \frac{3}{2}T, \dots \end{aligned} \quad (144)$$

где

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (145)$$

При этом легко убедиться, что если при $t=t_1$ мы имеем максимум q , то все значения t , стоящие в верхней строчке, соответствуют также максимуму $\frac{d^2q}{dt^2} < 0$, а все значения нижней строчки — минимуму q . Таким образом, хотя затухающие колебания не являются периодическим процессом в строгом смысле этого слова, этот процесс обладает все же определенной повторяемостью в том смысле, что максимальные и минимальные значения заряда (а также тока и напряжения) достигаются через одинаковые промежутки времени T . То же относится и к значениям заряда (силы тока и напряжения), равным нулю. Этот промежуток времени T мы и называем периодом затухающих колебаний.

Пусть q_n и q_{n+1} — максимальные значения заряда конденсатора (кривая б см. рисунок 70) в двух последовательных максимумах с номерами n и $(n+1)$. Они достигаются в моменты времени t_n и t_{n+1} , причем $t_{n+1}=t_n+T$. Согласно (139) и (145) имеем:

$$q_n = Ae^{-\alpha t_n} \cos(\omega t_n + \varphi) \quad (146)$$

$$q_{n+1} = Ae^{-\alpha(t_n+T)} \cos\left(\omega\left(t_n + \frac{2\pi}{\omega}\right) + \varphi\right) = Ae^{-\alpha(t_n+T)} \cos(\omega t_n + \varphi) \quad (147)$$

Деля почленно оба эти равенства, находим:

$$\frac{q_n}{q_{n+1}} = e^{\alpha T} \quad (148)$$

Отсюда видно, что отношение двух последовательных максимальных значений заряда не зависит от номера максимумов, или, иными словами, эти максимальные значения уменьшаются в геометрической прогрессии. Введенный логарифмический декремент затухания, следовательно, имеет значение

$$\delta = \ln \frac{q_n}{q_{n+1}} = \alpha T \quad (149)$$

он равен произведению из коэффициента затухания на период колебаний.

Логарифмический декремент затухания δ можно определить еще иначе: логарифмический декремент есть величина, обратная числу колебаний, после которого амплитуда уменьшается в e раз.

Для характеристики затухания колебательных контуров часто пользуются, особенно в радиотехнике, еще другой величиной, называемой добротностью контура и обозначаемой обычно Q . Она связана с логарифмическим декрементом соотношением:

$$Q = \pi\delta \quad (150)$$

Так как $\delta=1/N$, то

$$Q=\pi N \quad (151)$$

Добротность контура есть умноженное на π число полных колебаний, по истечении которых амплитуда уменьшается в e раз. Добротность контура, следовательно, тем выше, чем меньше затухание колебаний в нем.

Формула (140) показывает, что частота электрических колебаний зависит от коэффициента затухания α и не равна частоте колебаний ω_0 того же контура при сопротивлении $r=0$ ($\alpha=0$). С увеличением сопротивления контура частота ω уменьшается, а период колебаний T увеличивается.

Предположим теперь, что сопротивление контура велико, так что

$$\omega_0^2 < \alpha^2 \quad (152)$$

В этом случае частота ω , выражаемая формулой (140), будет мнимой. Это значит, что решение (139) уже не имеет места, а следовательно, электрических колебаний в контуре не будет. В этом случае решение основного уравнения (149) имеет вид:

$$q = A_1 e^{-k_1 t} + A_2 e^{-k_2 t} \quad (153)$$

где

$$k_1 = \alpha + \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}, k_2 = \alpha - \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2} \quad (154)$$

а A_1 и A_2 — произвольные постоянные. Подставляя (153) в (119), можно убедиться, что уравнение при этом удовлетворяется тождественно, а следовательно, (153) есть действительно искомое решение. Так как $\omega_0^2 < \alpha^2$, то k_1 и k_2 оба вещественны и положительны.

Значения постоянных A_1 и A_2 определяются начальными условиями задачи. Если таковыми являются условия (150), то

$$q = A_1 + A_2 \text{ при } t = 0 \quad (155)$$

$$\frac{dq}{dt} = -k_1 A_1 - k_2 A_2 \text{ при } t = 0 \quad (156)$$

Это дает:

$$A_1 = -q_0 \frac{k_1}{k_1 - k_2}, A_2 = q_0 \frac{k_2}{k_1 - k_2} \quad (157)$$

после чего решение (73) принимает вид:

$$q = \frac{q_0}{k_1 - k_2} (k_1 e^{-k_1 t} - k_2 e^{-k_2 t}) \quad (158)$$

На рисунке 53 изображены графически оба слагаемых этой формулы (пунктир) и их сумма (сплошная кривая). Мы имеем уже знакомый нам тип апериодического разряда (кривая г см. рисунок 70).

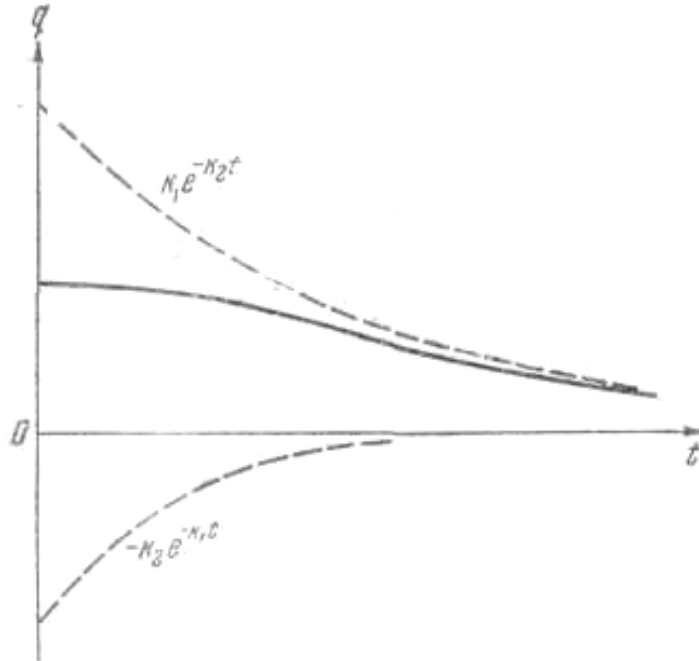


Рисунок 71 - Апериодический разряд конденсатора

Если сопротивление контура очень велико, так что $\alpha^2 \gg \omega_0^2$, то $k_1 \gg k_2$, и в последнем выражении можно пренебречь вторым слагаемым по сравнению с первым, а в знаменателе — k_2 по сравнению с k_1 . Тогда

$$q = q_0 e^{-k_2 t} \quad (159)$$

Этот случай соответствует кривой д на рисунке 70.

Из сказанного видно, что для возможности электрических колебаний необходимо, чтобы выполнялось условие (138). Подставляя вместо α и ω_0 их значения (145), находим условие возможности колебаний в виде:

$$\frac{1}{LC} > \frac{r^2}{4L^2} \quad (160)$$

или

$$r < 2\sqrt{\frac{L}{C}} \quad (161)$$

Пользуясь аналогией между механическими и электрическими колебаниями, можно просто вычислить период электрических колебаний, не прибегая к точной теории. Из механики известно, что период колебаний груза на пружине выражается формулой:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (162)$$

где m — масса груза, а k — упругость пружины. В случае электрических колебаний роль массы играет индуктивность L , а роль упругости — величина, обратная емкости, т. е. $1/C$. Заменяя в (162) m на L , а k на $1/C$, находим:

$$T = 2\pi \sqrt{LC} \quad (163)$$

Частота незатухающих электрических колебаний (число колебаний в 1 сек.) равна

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (164)$$

а круговая частота (число колебаний в 2π сек.)

$$\omega = 2\pi\nu \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (165)$$

Формула (165) была впервые получена В. Томсоном и носит его имя.

Если L и C в (165) выражать в абсолютной системе (либо обе величины в системе CGSE, либо обе в системе CGSM), то период T будет выражен в секундах. То же самое мы получим, выражая L в генри, а C — в фарадах, так как единица времени в практической системе также есть секунда.

Формула (165) показывает, что период колебаний увеличивается с увеличением емкости и самоиндукции контура. Поэтому, если выбрать L и C достаточно большими, то колебания можно сделать медленными и наблюдать их с помощью обычного стрелочного миллиамперметра, включенного в колебательный контур.

2.4 ОПТИКА

2.4.1 Закон отражения света от различных поверхностей

Рассмотрим задачу нахождения изображений при отражении света от различного типа зеркал. Законы образования изображений светящихся точек при отражении в зеркале и при преломлении в линзе во многом аналогичны.

Эта аналогия, конечно, не случайна; она обусловлена тем, что формально закон отражения является частным случаем закона преломления (при $n = -1$).

Наиболее просто решается поставленная нами задача для отражения световых лучей от плоского зеркала. Вместе с тем отражение света от плоского зеркала представляет собой наиболее простой и общеизвестный случай образования мнимых изображений.

Пусть пучок лучей от точечного источника S (см. рисунок 72) падает на плоское зеркало (металлическое зеркало, поверхность воды и т. д.). Проследим, что произойдет с этим конусом лучей, имеющим вершину в точке S . Возьмем два произвольных луча SA и SB . Каждый из них отразится по закону отражения, и угол каждого из них с нормалью останется после отражения неизменным. Следовательно, останется неизменным и угол между лучами после отражения.

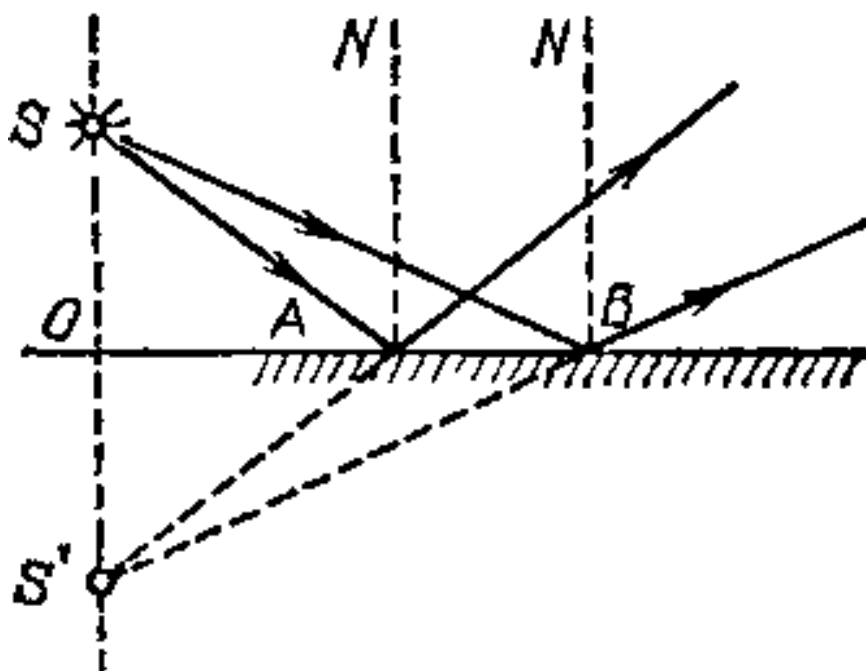


Рисунок 72 - Образование мнимого изображения точки в плоском зеркале

Этот угол между отраженными лучами можно изобразить на рисунке, продолжив отраженные лучи назад, за плоскость зеркала, что показано на чертеже штриховыми линиями. Точка пересечения S' продолжения лучей за зеркалом будет лежать на той же нормали к зеркалу, что и точка S , и на том же расстоянии от плоскости зеркала, в чем легко убедиться из равенства треугольников SAO и $S'AO$ или SBO и $S'BO$.

Ввиду того что рассмотренные лучи SA и SB были совершенно произвольными, мы вправе установленные для них результаты отражения от плоского зеркала распространить на весь световой пучок. Следовательно, можно утверждать, что при отражении от плоского зеркала пучок световых лучей, исходящих из одной точки, превращается в световой пучок, в котором продолжения всех световых лучей снова пересекаются, в одной и той же точке.

В результате наблюдателю, помещенному на пути отраженных лучей, они будут казаться пересекающимися в точке S_r , и эта точка будет мнимым изображением точки S . Изображение будет мнимым в указанном выше смысле: никаких лучей в точке S' за зеркалом нет, но точка S' является вершиной пучка лучей, повернутого после отражения от зеркала.

Рассмотрение мнимого изображения светящейся точки в плоском зеркале и сделанные выводы о положении этого изображения «за зеркалом» позволяют легко найти также изображение протяженного объекта в плоском зеркале.

Пусть перед зеркалом находится прямолинейный светящийся отрезок AB (см. рисунок 73). Выполняя по найденному рецепту построение точек A' и B' и соединяя их прямой, мы получим изображение всех точек отрезка. Это вытекает из элементарных геометрических соображений. Так как отрезок AB был выбран совершенно произвольно, то точно так же можно построить изображение любого предмета. При этом из параллельности между собой всех нормалей к зеркалу ясно, что размеры мнимого изображения в плоском зеркале равны размерам предмета, поставленного перед зеркалом. В решении, найденном для случая отражения световых пучков от плоского зеркала, необходимо подчеркнуть, что каждая точка светящегося объекта изобразится в плоском зеркале также в виде точки (т. е. стигматически).

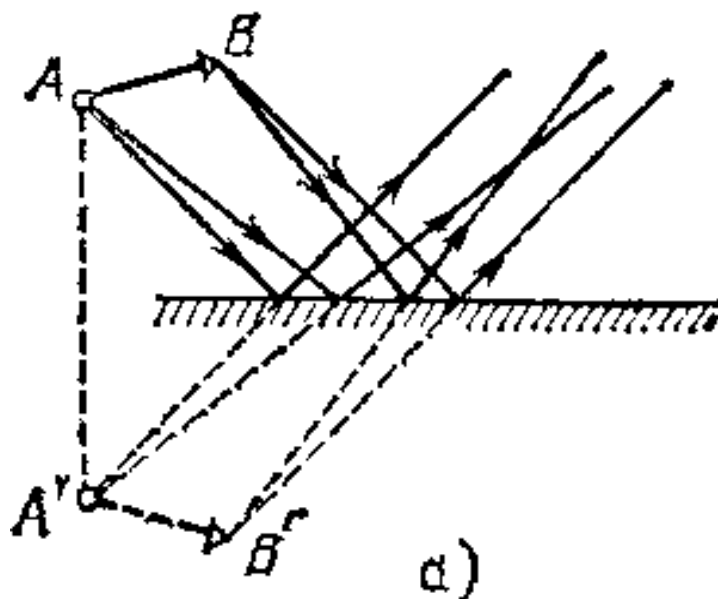


Рисунок 73- Образование мнимого изображения прямолинейного отрезка в плоском зеркале

Переходим теперь к рассмотрению сферических зеркал. На рисунке 74 изображено сечение APB вогнутого сферического зеркала радиуса R с центром сферы в точке C . Средняя точка имеющейся части сферической поверхности называется полюсом зеркала P . Нормаль к зеркалу, проходящая через центр зеркала и через его полюс, называется главной оптической осью зеркала. Нормали к зеркалу, проведенные в других точках его поверхности и также, конечно, проходящие через центр зеркала C , носят название побочных

оптических осей. Одна из них (МС) показана на рисунке 74. Все нормали к сферической поверхности, конечно, равноправны, и выделение главной оптической оси среди побочных не является существенным (Следует отметить, что в линзах главная оптическая ось отличается от побочных тем, что она единственная ось, проходящая через центры обеих сферических поверхностей, ограничивающих линзу). Диаметр окружности, ограничивающей сферическое зеркало, носит название отверстия зеркала.

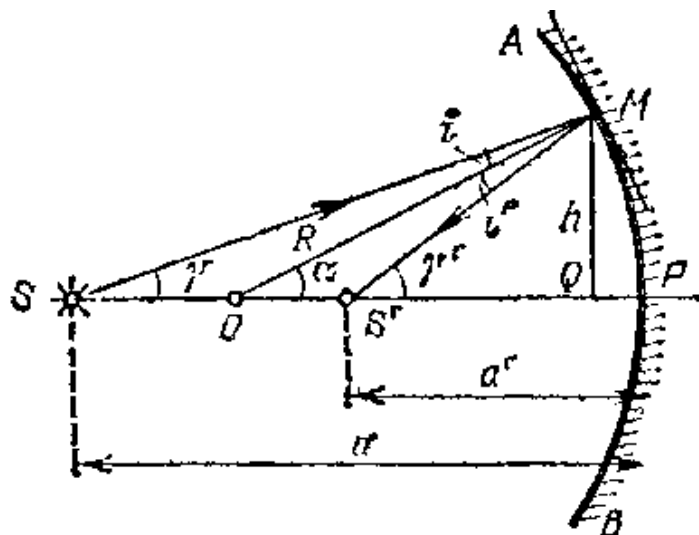


Рисунок 74 - Отражение от сферического зеркала луча SM, выходящего из точки M

Пусть точечный источник света S расположен на главной оси зеркала на расстоянии $SP=a$ от полюса. Рассмотрим произвольный луч SM, принадлежащий к узкому пучку, т. е. образующий с осью малый угол γ и падающий на зеркало в точке M на высоте h над осью, так что h мало по сравнению с a и с радиусом зеркала R . Отраженный луч пересечет ось в точке S' на расстоянии $S'P=a'$ от полюса. Угол, образуемый отраженным лучом с осью, обозначим γ' . Он также будет мал.

Очевидно, SM есть перпендикуляр к поверхности зеркала в точке падения, i — угол падения, i' — угол отражения. По закону отражения

$$i=i' \quad (166)$$

Обозначим буквой α угол, образуемый радиусом CM с осью. Из треугольника SMC имеем

$$i + \gamma = \alpha \quad (167)$$

из треугольника CMS'

$$\gamma' = \alpha + i' \quad (168)$$

Складывая (167) и (168) и учитывая, $i=i'$ что находим

$$\gamma + \gamma' = 2\alpha \quad (169)$$

Так как мы рассматриваем узкий пучок лучей, прилегающих к главной оси, т. е. углы γ , γ' и α малы, то можно заменить синусы углов самими углами и пренебречь длиной отрезка PQ. Тогда будем иметь приближенные равенства:

$$\gamma = \sin \gamma = h/a, \gamma' = \sin \gamma' = h/a', \alpha = \sin \alpha = h/R \quad (170)$$

Подставляя полученные равенства в уравнение (46) и сокращая на общий множитель h , находим

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{2}{R} \quad (171)$$

То, что высота h , равно как и угол γ не входят в окончательный результат, означает, что любой луч, выходящий из точки S (и принадлежащий к достаточно узкому пучку), после отражения пройдет через точку S' на расстоянии a' от полюса. Таким образом, точка S' есть изображение точки S .

Видно, что при отражении в сферическом зеркале изображением точечного источника является снова точка. Как и в случае линзы, точка S , в которой расположен источник, и точка S' , в которой находится изображение, сопряжены между собой, т. е., поместив источник в точку S' , мы получим изображение в точке S (следствие закона обратимости световых лучей).

Полученная формула (171) является основной формулой сферического зеркала.

Можно доказать, что для выпуклого сферического зеркала формула (171) остается в силе.

Найдем теперь положение фокуса F сферического зеркала, т. е. точки, в которой пересекутся после отражения в подобном зеркале лучи, параллельные его главной оси. Как известно, для получения параллельного пучка лучей источник нужно удалить весьма далеко, т. е. положить в формуле (171) $1/a=0$. В этом случае $a'=f$ есть фокусное расстояние зеркала. Для величины фокусного расстояния, пользуясь формулой (171), находим:

$$f = \frac{R}{2} \quad (172)$$

Соединяя формулы (171) и (172), получим формулу зеркала в виде:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{f}, \quad (173)$$

т.е. в виде, аналогичном формуле тонкой линзы.

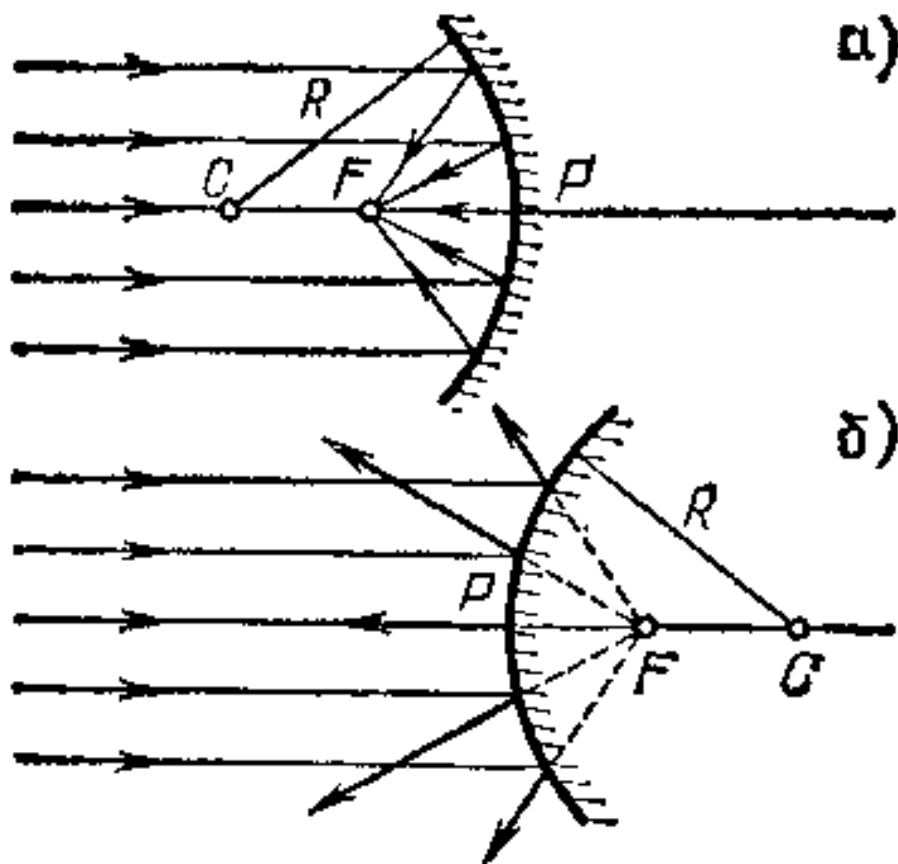


Рисунок 75 - Фокусы сферических зеркал: а) вогнутое зеркало; б) выпуклое зеркало. (Лучи показаны падающими на значительную часть сферических зеркал. Их следует представлять себе пересекающимися зеркало на малой высоте от оси, т. е. захватывающими малую часть зеркала.)

В случае вогнутого зеркала фокус расположен на середине расстояния между полюсом и центром слева от полюса (см. рисунок 75, а); в случае выпуклого зеркала фокус расположен на расстоянии $R/2$ справа от полюса, т. е. является мнимым (см. рисунок 75, б).

Пользуясь тем, что источник и его изображение находятся в сопряженных между собой точках, можно сделать вывод, что если точечный источник света находится в фокусе зеркала, то его изображение находится в бесконечности, т.е. из зеркала выходит параллельный пучок лучей. Это условие служит основой для получения при помощи вогнутых зеркал параллельных световых пучков, точнее, пучков, близких к параллельным (например, прожектор).

Заметим, что при рассмотрении свойств сферического зеркала, как и в случае линзы, предполагалось, во-первых, что используется очень узкий пучок лучей, прилегающих к оси зеркала, и, во-вторых, что применяется точечный источник света. Оба эти требования, конечно, вполне строго выполнены быть не могут. Вопрос о том, насколько существенны отступления от этих требований, в каждой конкретной задаче должен решаться особо.

Проследим, как будет меняться положение изображения при приближении источника света из бесконечности к вогнутому зеркалу (см. рисунок 76, а - г). Из формулы (8) видно, что если источник проделает путь из бесконечности до центра зеркала, то его изображение переместится из фокуса в центр зеркала. В итоге положения источника и изображения совпадут (см. рисунок 76, б).

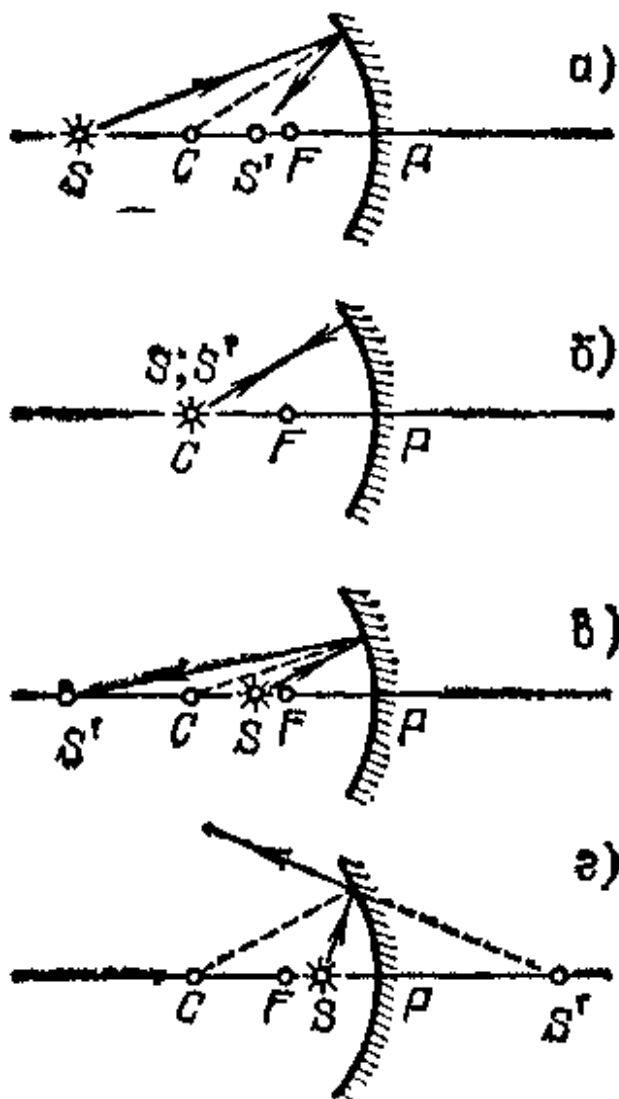


Рисунок 76 - Образование изображения в вогнутом сферическом зеркале при различных положениях точечного источника на оси зеркала: а) источник между центром и бесконечностью; б) в центре; в) между центром и фокусом; г) между фокусом и зеркалом

При перемещении источника света от центра к фокусу его изображение удаляется от центра зеркала (см. рисунок 76, в). При помещении источника света в фокус его изображение уходит в бесконечность, т. е., как мы уже знаем, точечный источник в фокусе зеркала дает пучок параллельных лучей.

Если, наконец, источник света находится между фокусом зеркала и его полюсом, то отраженные лучи не будут иметь общей вершины с вогнутой стороны зеркала и нигде не пересекут главной оси зеркала (см. рисунок 76, г).

Только их продолжения за зеркалом (показанные на рисунке штриховыми линиями) будут иметь общую вершину (S'). Это значит, что изображение в данном случае будет мнимым. Для отыскания его положения достаточно продолжить за зеркало направление любого отраженного луча; место его пересечения с главной осью даст положение изображения.

Рассмотрим изображения, даваемые выпуклым сферическим зеркалом. Мы уже видели, что выпуклое зеркало имеет мнимый фокус на расстоянии $R/2$ от полюса. Построение изображения для точки, расположенной на конечном расстоянии от зеркала, выполнено на рисунке 77. Видно, что выпуклое зеркало всегда дает мнимое изображение.

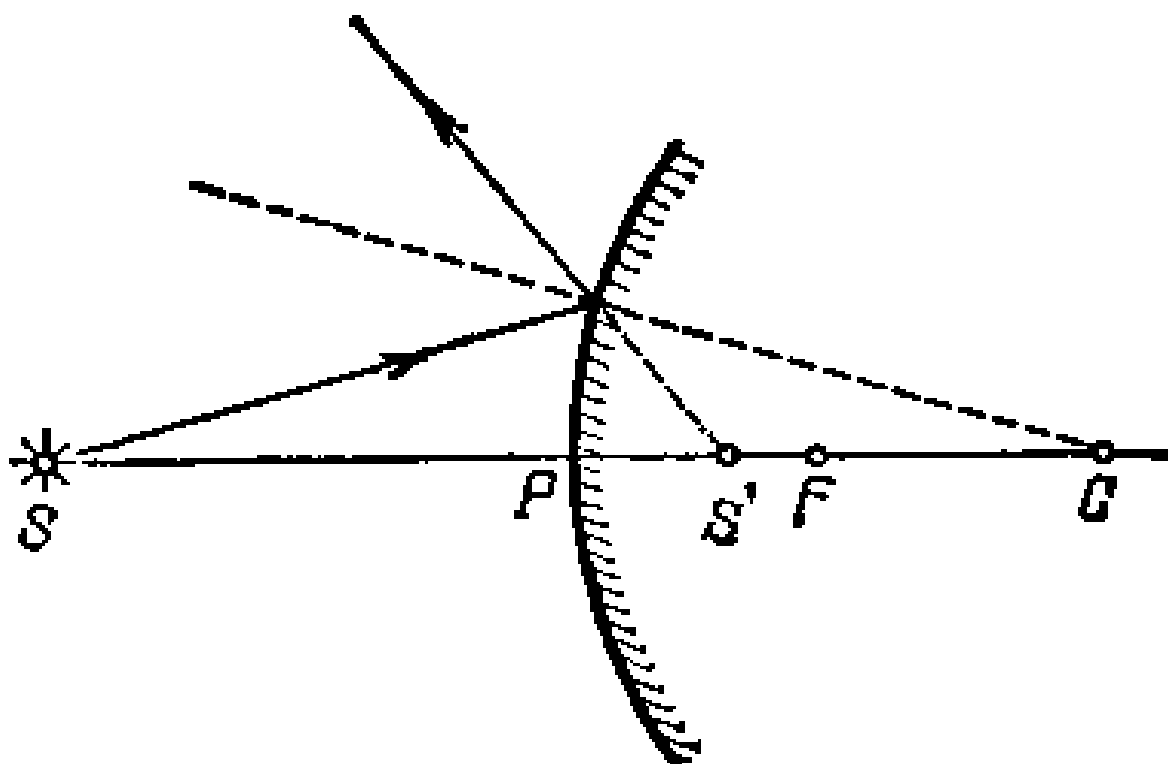


Рисунок 77 - Построение мнимого изображения в выпуклом сферическом зеркале

До сих пор предполагалось, что источник света представляет собой светящуюся точку, находящуюся на главной оптической оси зеркала или линзы. Рассмотрим теперь изображение в сферическом зеркале небольших предметов, расположенных вблизи главной оси. Выражение «небольшой предмет» будет означать, что данный предмет виден из центра зеркала под малым углом. Так как отдельные точки протяженного предмета лежат вне главной оптической оси, то поставленная задача сводится к построению изображения таких «внеосевых» точек. Задача эта решается без труда. Разберем ее для случая сферического зеркала.

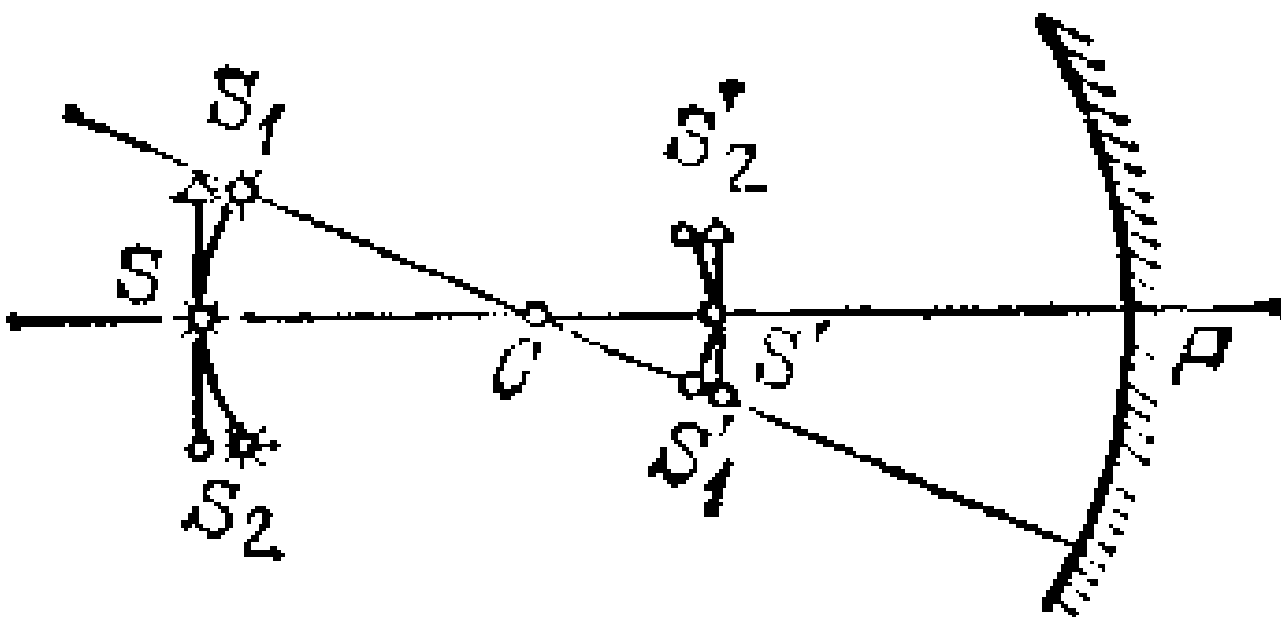


Рисунок 78 - Построение изображения протяжённого объекта в сферическом зеркале

Пусть точечный источник света находится в точке S_1 на некотором расстоянии от главной оси зеркала (см. рисунок 78). Проведем через него побочную оптическую ось. По отношению к отражению в сферическом зеркале точка S_1 вполне равноправна с точкой S , лежащей на главной оси зеркала на том же расстоянии от его центра C . Таким образом, если выделить узкий пучок лучей вблизи оси S_1C , то, можно утверждать, что он после отражения соберется снова в одной точке S'_1 — изображении точки S_1 . Легко видеть, что любая точка дуги S_1SS^* с центром в точке C изобразится точкой, лежащей на дуге $S'_1S'S'_2$ с центром также в C . Другими словами, дуга $S'_1S'S'_2$ является изображением дуги S_1SS_2 .

Будем предполагать, что все точки дуги S_1SS_2 находятся на небольшом расстоянии от главной оси. Тогда практически можно заменить дуги S_1SS_2 и $S'_1S'S'_2$ прямолинейными отрезками, перпендикулярными к главной оси.

Итак, доказано, что небольшой отрезок, перпендикулярный к главной оси, изобразится после отражения в сферическом зеркале также отрезком, перпендикулярным к главной оси. Этот вывод имеет силу только при условии достаточной малости угла, под которым объект виден из центра зеркала; в противном случае заменить дугу прямолинейным отрезком нельзя. Практически нарушение этого условия приводит к тому, что изображение становится нечетким, расплывчатым по краям.

Теперь надо рассмотреть еще вопрос о размерах изображения, получающегося в зеркале и линзе. Выполненные на рисунке 78 построения сразу указывают на то, что, в отличие от случая плоского зеркала, размер изображения, даваемого сферическим зеркалом, будет меняться в зависимости от положения объекта по отношению к фокусу зеркала. Так, например, если объект находится много дальше фокуса вогнутого зеркала, то его изображение получается уменьшенным. Если объект находится между зеркалом и фокусом, то изображение получается мнимым и увеличенным.

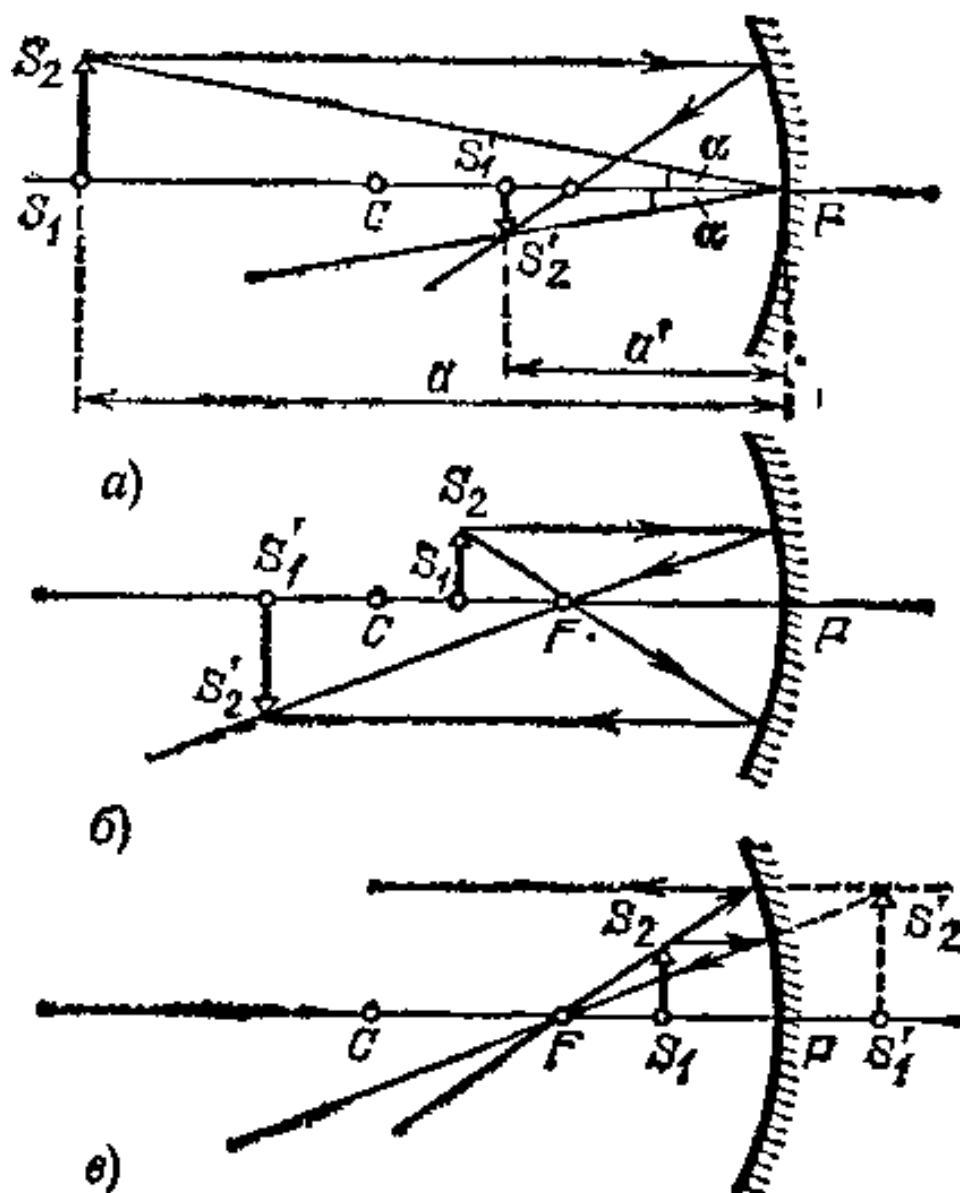


Рисунок 79 - Изображения протяженных объектов в вогнутом сферическом зеркале. Объект расположен: а) за центром зеркала (изображение действительное, обратное и уменьшенное); б) между центром и фокусом (изображение действительное, обратное и увеличенное); ближе фокуса (изображение мнимое, прямое и увеличенное)

Отношение линейных размеров изображения $S'_1S'_2=y'$ к линейным размерам предмета $S_1S_2=y$ называется линейным, или поперечным, увеличением:

$$\beta = \frac{y'}{y} = \frac{S'_1S'_2}{S_1S_2} \quad (174)$$

Из подобия треугольников S_1PS_2 и $S'_1PS'_2$ (см. рисунок 79, а) находим

$$\beta = \frac{y'}{y} = \frac{a'}{a} \quad (175)$$

Можно убедиться, что равенство (175) справедливо и в других случаях получения изображения при помощи сферических зеркал (см. рисунок 79, б и в).

Обобщим методы построения изображений в сферическом зеркале.

При построении изображения любой точки источника нет надобности рассматривать много лучей. Для этого достаточно построить два луча; точка их пересечения определит местоположение изображения. Удобнее всего построить те лучи, ход которых легко проследить. Ход этих лучей случае отражения от зеркала изображен на рисунке 80.

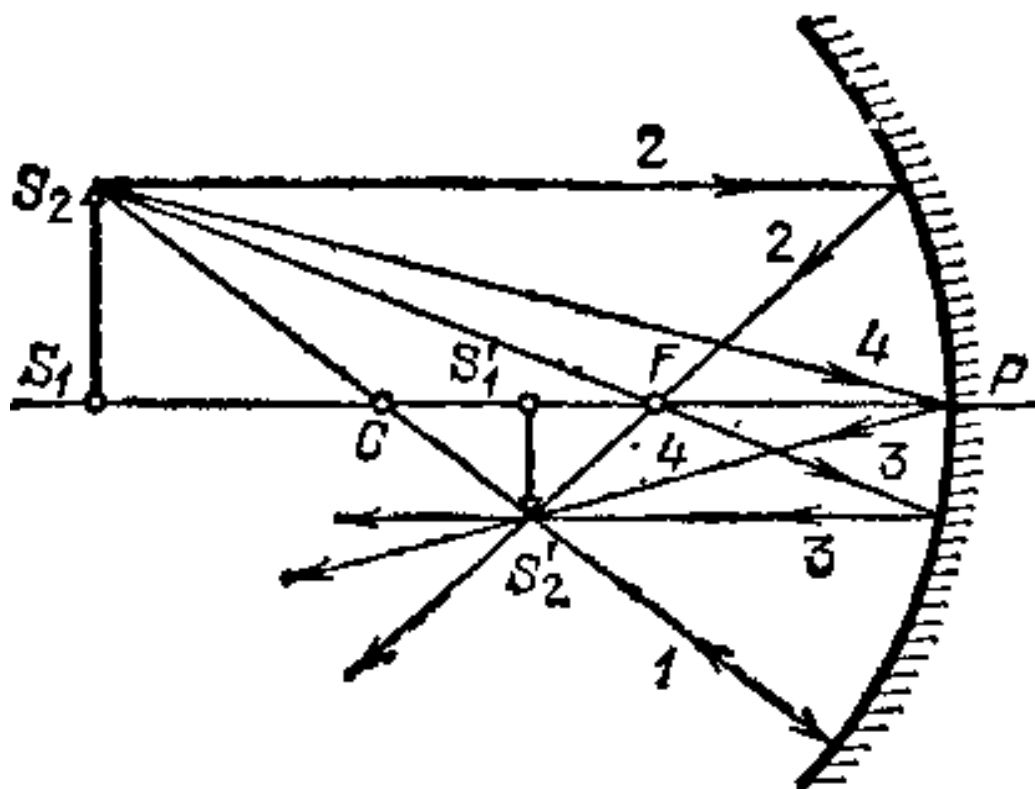


Рисунок 80 - Различные приемы построения изображения в вогнутом сферическом зеркале

Луч 1 проходит через центр зеркала и поэтому нормален к поверхности зеркала. Этот луч возвращается после отражения точно назад вдоль побочной или главной оптической оси.

Луч 2 параллелен главной оптической оси зеркала. Этот луч после отражения проходит через фокус зеркала.

Луч 3, который от точки объекта проходит через фокус зеркала. После отражения от зеркала он идет параллельно главной оптической оси.

Луч 4, падающий на зеркало в его полюсе, отразится назад симметрично по отношению к главной оптической оси.

Для построения изображения можно воспользоваться любой парой этих лучей.

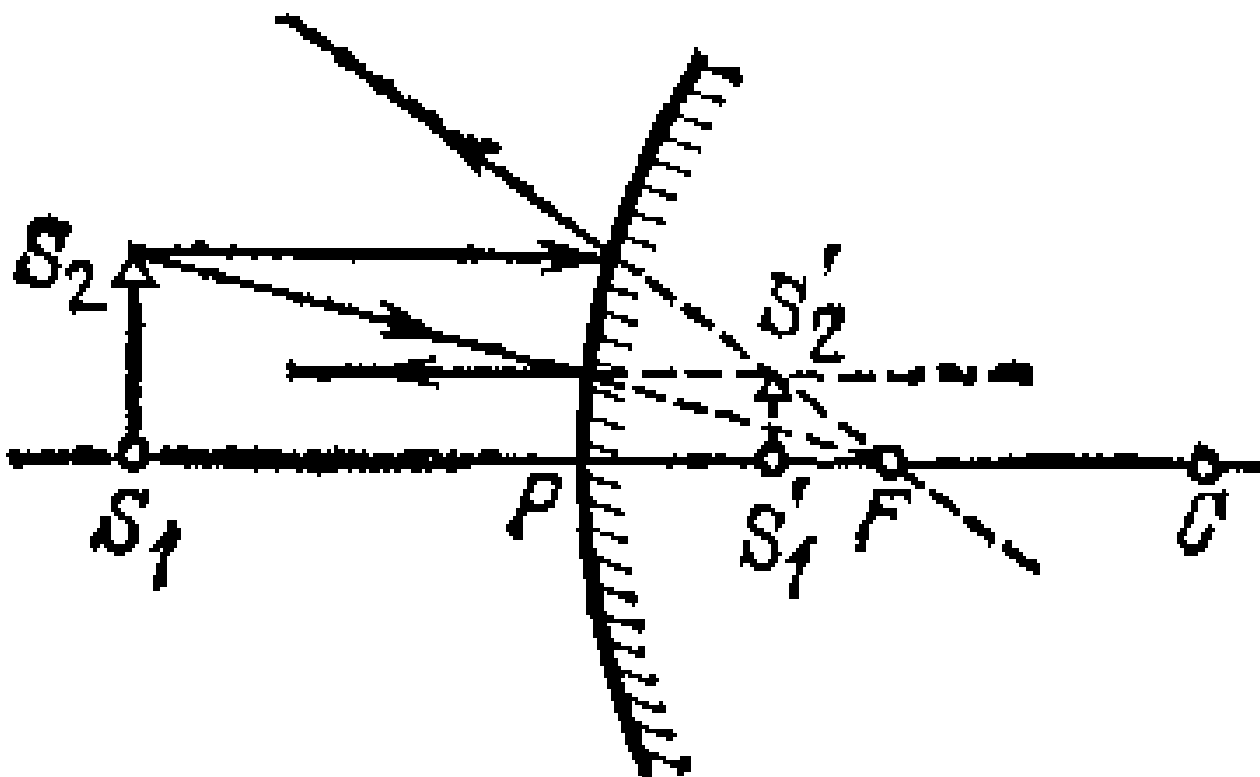


Рисунок 81 - Построение изображения в выпуклом сферическом зеркале

Построив изображения достаточного числа точек протяженного объекта, можно составить представление о положении изображения всего объекта. В случае простой формы объекта, указанной на рисунке 80 (отрезок прямой, перпендикулярный к главной оси), достаточно построить всего одну точку изображения $S'2$.

На рисунке 80 были даны геометрические построения изображений для разных положений объекта перед зеркалом. Рисунок 79, в — объект помещен между зеркалом и фокусом — иллюстрирует построение мнимого изображения при помощи продолжения лучей за зеркало.

На рисунке 81 дан пример построения изображения в выпуклом зеркале. Как было указано ранее, в этом случае получаются всегда мнимые прямые и уменьшенные изображения.

2.4.2 Преломление света различными поверхностями

Сферическая поверхность образовывается путем вращения дуги с радиусом кривизны r (см. рисунок 82, а) относительно центра вращения C с радиусом вращения R . Для образования сферической поверхности необходимо выдержать условие: $r=R$. Если радиус кривизны дуги AB равен бесконечности,

то при вращении такой дуги получается **цилиндрическая** поверхность (см. рисунок 82, б).

Цилиндрическая поверхность есть соединение частных случаев сферической поверхности. В одном сечении действует сферическая поверхность с радиусом R конечного значения, а в другом — тоже сферическая поверхность, но с $r = \infty$.

Если r конечен и не равен R , можно рассмотреть два случая: $R > r$ (рисунок 82, в) и $r < R$ (рисунок 82, г).

В обоих случаях образуются **торические** поверхности. В торических поверхностях имеем два взаимно перпендикулярных главных сечения, повернутых друг относительно друга на 90° , в которых действуют как бы сферические поверхности с радиусами кривизны r и R .

Оптическая система, для которой толщины линз и воздушных промежутков приняты равными нулю, называется **тонкой**.

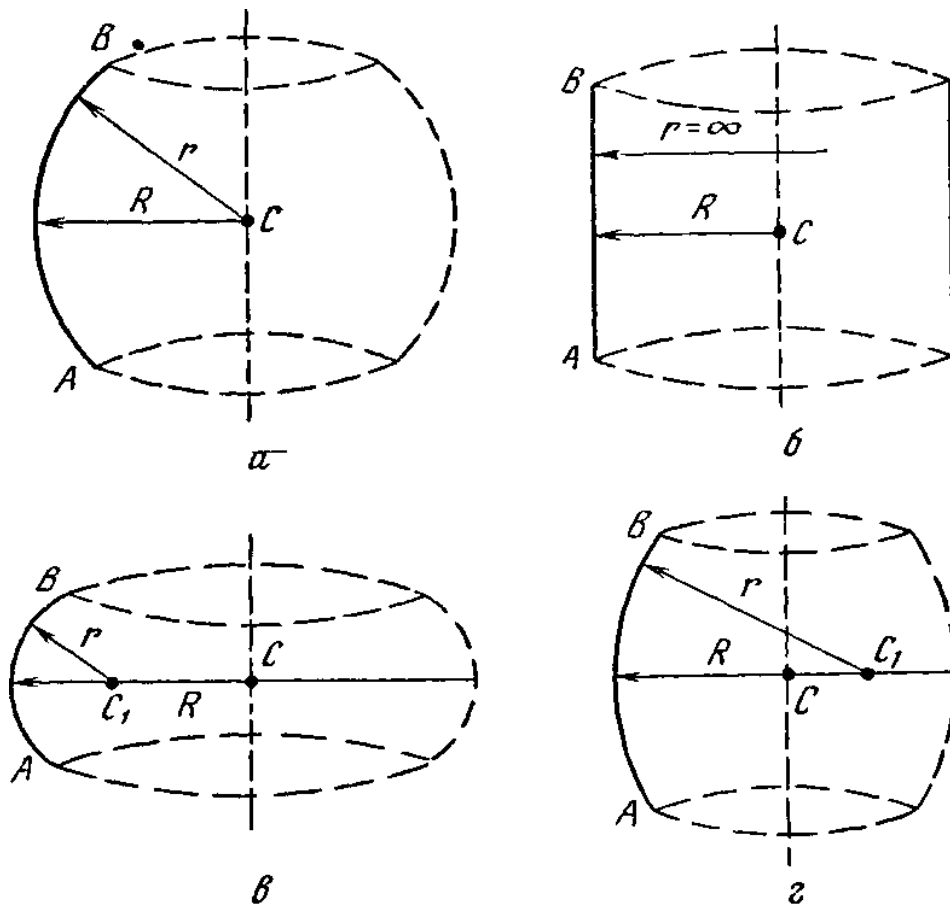


Рисунок 83— Некоторые виды поверхностей

Сферическая поверхность O с радиусом кривизны r (см. рисунок 83) разделяет две оптические среды с показателями преломления n и n' . Предмет расположен в точке A на расстоянии s от поверхности, а его изображение — в точке A' на расстоянии s' от той же поверхности. Луч света из точки A направляется на сферическую поверхность в точку M под конечным углом i . Луч падающий и луч преломленный с перпендикуляром MC образуют углы i и i' . Высота падения луча на поверхность h . Преломленный луч направляется в

точку A' под углом i' . Обозначим расстояние от точек предмета A и изображения A' до центра кривизны C через q и q' . Знаки величин указаны в соответствии с правилом знаков. Сферическая поверхность O разделяет два пространства — пространство предметов и пространство изображений.

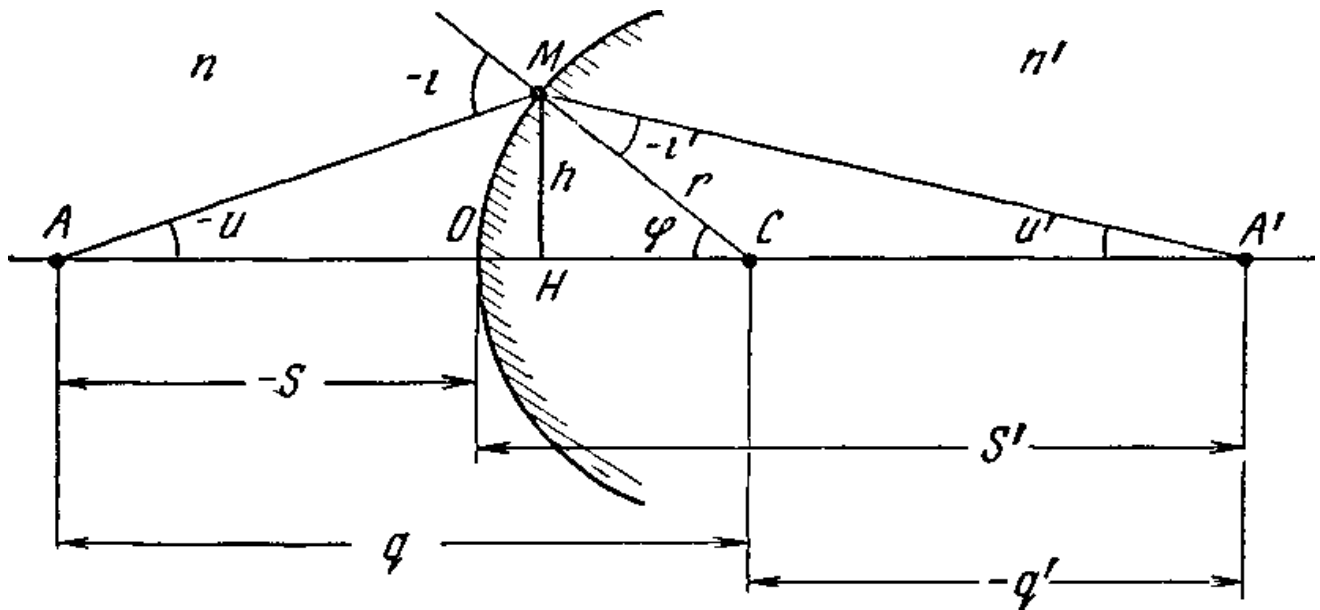


Рисунок 83 - Сферическая преломляющая поверхность

Начальными данными для вычисления преломления луча на поверхности являются расстояние предмета от поверхности s и угол u , под которым луч направляется на поверхность. Для вычисления преломления луча необходимо знать значение кривизны поверхности и значения показателей преломления оптических сред, разделенных этой поверхностью. Искомыми данными являются положение изображения за поверхностью s' и угол u' , под которым луч выходит из поверхности.

Рассмотрим преломление действительного луча на одной сферической поверхности. Из рисунка 83 следует

$$q = r - s \quad (176)$$

Из треугольника AMC по формуле синусов имеем

$$-\frac{r}{\sin u} = \frac{q}{\sin(180+i)} \quad (177)$$

или

$$\sin i = \frac{q \sin u}{r} \quad (178)$$

Угол преломления i' найдем из закона преломления

$$\sin i' = \frac{n \sin i}{r} \quad (179)$$

Из треугольника АМС имеем:

$$-i = \varphi - u \quad (180)$$

а из треугольника СМА':

$$\varphi = u' - i' \quad (181)$$

Отсюда

$$u' = u + i' + i \quad (182)$$

По формуле синусов, из треугольника СМА' имеем:

$$q' = \frac{r \sin i'}{\sin u'} \quad (183)$$

и, наконец, как видно из рисунка,

$$s' = r - q' \quad (184)$$

Формулы (176) - (184) являются основными для вычисления преломления луча на одной поверхности.

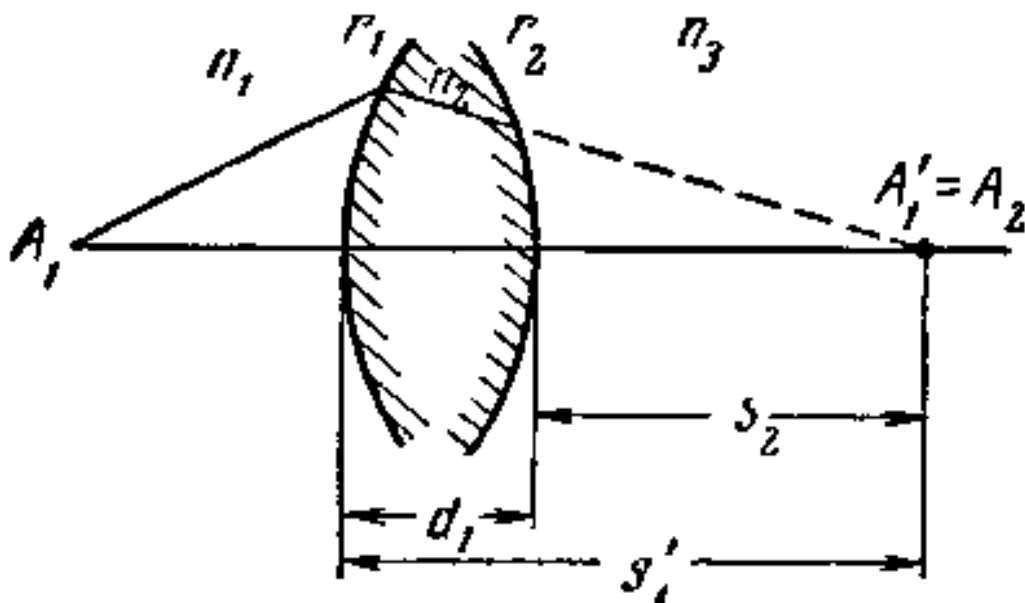


Рисунок 84 - К определению положения предмета для второй поверхности

Если оптическая система состоит из нескольких поверхностей, то необходимо последовательно выполнить аналогичные вычисления через все поверхности. При этом $i_1' = i_2$; $i_2' = i_3$ и т.д. Точка изображения после первой поверхности будет являться точкой предмета для второй поверхности и т. д. Рисунок 84 поясняет переход с первой поверхности на вторую (здесь и в дальнейшем преломляющая поверхность обозначается индексом, характеризующим радиус кривизны этой поверхности). Можно видеть, что

$$s_2 = s_1' - d_1 \quad (185)$$

Высоту луча на поверхности можем найти из треугольника МНС (см. рисунок 84):

$$h = r \sin(u' - i') \quad (186)$$

Предположим, что луч АМ является нулевым. Из уравнений (178) и (183) следует:

$$\frac{q \sin u}{\sin i} = \frac{q' \sin u'}{\sin i'} \quad (187)$$

Подставив сюда уравнения (175), (178) и (184) и заменив $\sin u$ и $\sin u'$ на u и u' соответственно, причем $u = \frac{h}{s}$, а $u' = \frac{h}{s'}$, получим

$$\frac{u(r-s)}{s} = \frac{u'(r-s')}{s'} \quad (188)$$

Разделив обе части равенства на r , получим

$$n \left(\frac{1}{s} - \frac{1}{r} \right) = n' \left(\frac{1}{s'} - \frac{1}{r'} \right) \quad (189)$$

Это выражение носит название «нулевого» инварианта Аббе. Открыв скобки, получим последнее выражение в иной форме:

$$\frac{n'}{s'} - \frac{n}{s} = \frac{n' - n}{r} \quad (190)$$

В таком виде это уравнение называется **уравнением нулевого луча**.

Из уравнения (187) можем найти фокусные расстояния одной поверхности. Предположим, что луч идет на поверхность из бесконечности, тогда $s=-\infty$, а $s'=f'$. Подставляя эти равенства в формулу (187), получим

$$-\frac{n}{r} = n' \left(\frac{1}{f'} - \frac{1}{r} \right) \quad (191)$$

или заднее фокусное расстояние

$$f' = \frac{n'r}{n'-n} \quad (192)$$

Если же $s'=\infty$, то $s=f$ и из уравнения (187) переднее фокусное расстояние

$$f' = -\frac{nr}{n'-n} \quad (193)$$

Разделив выражение (189) на (190), получим зависимость между фокусными расстояниями и показателями преломления

$$\frac{f'}{f} = -\frac{n'}{n} \quad (194)$$

Эту зависимость, найденную для одной поверхности, можно распространить и на систему, состоящую из ряда поверхностей.

В однородной среде фокусные расстояния оптической системы, переднее и заднее, равны по абсолютной величине и противоположны по знаку.

Если же первая и последняя оптические среды не одинаковы, что имеет место, например, если линза или объектив опущены в воду, то абсолютное значение фокусного расстояния зависит от величины радиуса кривизны первой поверхности. Отношение же переднего и заднего фокусных расстояний определяется уравнением (194).

Вернемся к рисунку 83 и установим зависимость между углами u и u' для нулевого луча. Эти углы в параксиальной области обозначим через α .

Закон преломления напишем в виде

$$ni = n'i' \quad (195)$$

Так как $i = \alpha - \varphi$, а $i' = \alpha' - \varphi$ можем записать

$$n(\alpha - \varphi) = n'(\alpha' - \varphi) \quad (196)$$

Подставим сюда выражение $\varphi = \frac{h}{r}$ - и откроем скобки

$$n\alpha - \frac{nh}{r} = n'\alpha' - \frac{n'h}{r} \quad (197)$$

и после преобразования окончательно получим

$$\alpha' = \frac{n}{n'}\alpha + \frac{h(n'-n)}{rn'} \quad (198)$$

Таким образом, мы получили **уравнение углов нулевого луча**.

Переходя к индексам поверхностей, уравнение (198) перепишем в виде

$$\alpha_{k+1} = \frac{n_k}{n_{k+1}}\alpha_k + \frac{h_k(n_{k+1}-n_k)}{r_k n_{k+1}} \quad (199)$$

Отсюда получим формулу радиуса

$$r_k = \frac{h_k(n_{k+1}-n_k)}{\alpha_{k+1}n_{k+1}-\alpha_k n_k} \quad (200)$$

Если в уравнении (200) положить

$$\alpha_k n_k = \gamma_k \quad (201)$$

то оно примет вид

$$\gamma_{k+1} = \gamma_k + h_k \frac{n_{k+1}-n_k}{r_k} \quad (202)$$

В таком виде эта формула дает возможность наиболее просто производить вычисление прохождения нулевого луча через сложную оптическую систему.

Для вычисления хода луча, кроме того, необходимо знать формулу определения высоты **h**.

Луч (см. рисунок 85) падает на поверхность с радиусом кривизны r_k на высоте h_k , после преломления встречается поверхность с радиусом кривизны r_{k+1} на высоте h_{k+1} . Расстояние между поверхностями **d_k**.

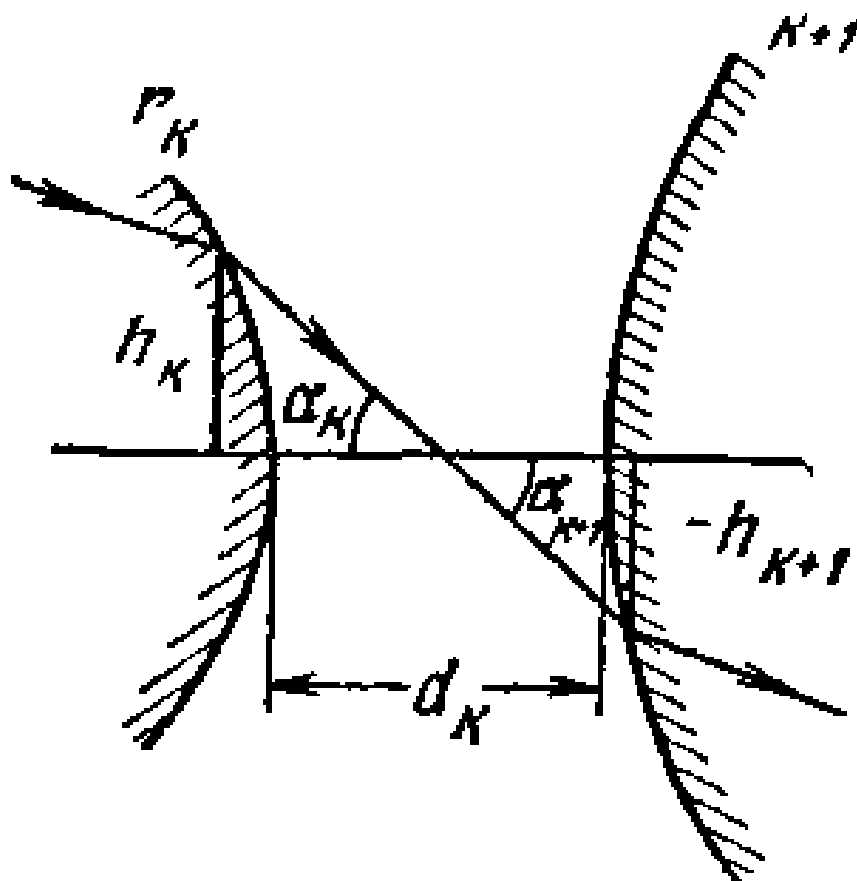


Рисунок 85 - К выводу формулы высот

Так как луч нулевой, то практически расстояние между вершиной поверхности и следом перпендикуляра (высоты) на оптической оси для каждой поверхности равно нулю.

Итак,

$$\frac{h_k - h_{k+1}}{d_k} = \alpha_{k+1} \quad (203)$$

Преобразуя, получим

$$h_{k+1} = h_k - \alpha_{k+1} d_k \quad (204)$$

В оптических приборах часто применяются детали с плоскими преломляющими поверхностями. К их числу относятся отражательные и преломляющие призмы, клинья, светофильтры, защитные стекла, сетки, зеркала с внутренним серебрением, плоско-выпуклые и плоско-вогнутые линзы и другие детали.

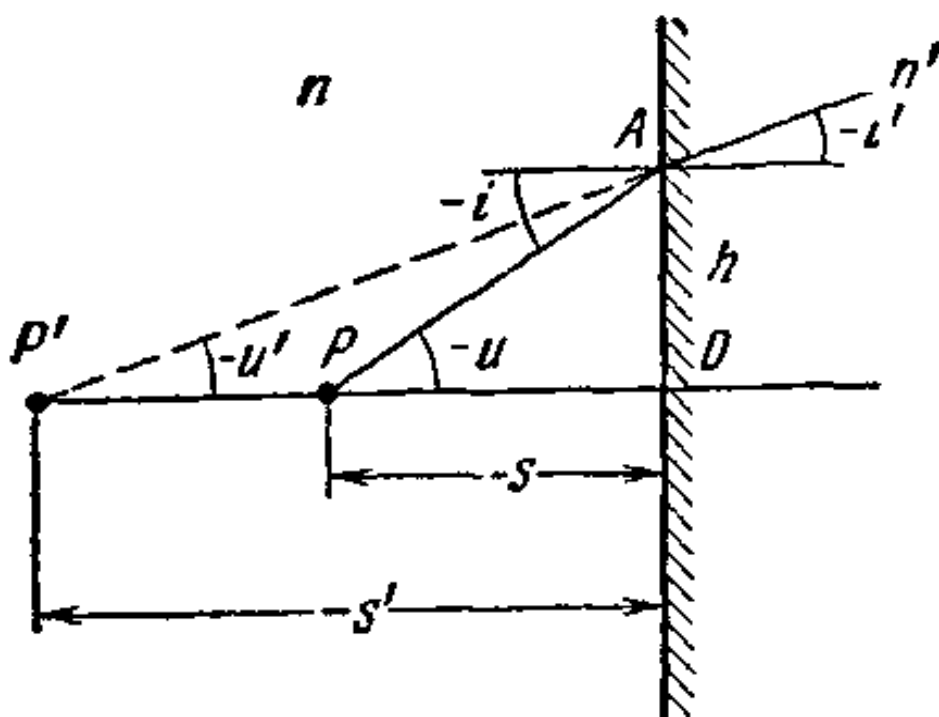


Рисунок 86 - Плоская преломляющая поверхность

Плоские поверхности всегда тем или иным способом влияют на ход лучей в оптической системе. Рассмотрим лишь на один случай, когда плоская поверхность не оказывает влияния на ход лучей — это случай, когда лучи падают параллельными пучками перпендикулярно к поверхности. Тогда они проходят ее без преломления, так как $i=i'=0$.

Но в практике такие случаи весьма редки, так как оптические приборы имеют обычно определенное поле зрения, и, кроме пучков лучей, идущих параллельно оптической оси, существуют пучки, идущие под углом к оси.

Плоская поверхность с радиусом кривизны $r=\infty$ (см. рисунок 86) разделяет две оптические среды с показателями преломления n и n' . Предмет расположен в точке P , а в точке P' расположено мнимое изображение.

Угол луча с осью u равен углу падения i , а угол u' после преломления равен углу преломления i' .

Из решения треугольников AOP и AOP' , опирающихся на одну и ту же высоту h , имеем

$$s' = \frac{s \operatorname{tg} u}{\operatorname{tg} u'} \quad (205)$$

Искомые величинами являются u' и s' . Знание этих величин позволяет перейти к вычислению прохождения луча через следующую поверхность.

Плоскопараллельной пластиной, называется оптическая деталь круглой или какой-либо другой формы, ограниченная с двух сторон полированными плоскими поверхностями, параллельными друг другу. Любая из нормалей к

поверхности может быть оптической осью, однако обычно таковой бывает ось симметрии детали.

Пучок лучей, ограниченный лучом **АР** (см. рисунок 87) и лучом, идущим по оптической оси, пересекается в точке **Р**. Эта точка является точкой предмета для пластины. Луч, идущий по оптической оси, встретив пластину, проходит дальше без преломления. Луч **АР** в точке **А** преломляется и встречает вторую поверхность в точке **В**. После преломления на второй поверхности луч направляется в точку **Р'**, где образует изображение точки **Р**.

Можно показать, что $u_1 = u_3$, т. е. луч при преломлении в пластинке не меняет своего направления, а лишь смещается. Действительно, $i_1 = u_1$ и $i_1' = i_2$. Тогда $i_1 = i_2'$, а следовательно, и $u_1 = u_3$.

Отрезок **РР'** определяет величину смещения луча **L**. Из рисунка 87 $L = DB - DK = d - AD \operatorname{ctg} i_1$. Но $AD = d \operatorname{tg} i_1$, тогда

$$L = d \left(1 - \frac{\operatorname{tg} i_1'}{\operatorname{tg} i_1} \right) \quad (206)$$

Найдем предел этого отношения при $i_1 \rightarrow 0$:

$$\lim_{i_1 \rightarrow 0} \left(\frac{\operatorname{tg} i_1'}{\operatorname{tg} i_1} \right) = \frac{1}{n} \quad (207)$$

Следовательно,

$$L_0 = \frac{n-1}{n} d \quad (208)$$

Последнее уравнение есть уравнение смещения нулевого луча плоскопараллельной пластиной вдоль оптической оси.

Представляет интерес также величина поперечного смещения **e** луча, вышедшего из пластины, по отношению к падающему.

Из рисунка 87 следует, что $e = AB \sin(i_1 - i_1')$ но

$$AB = \frac{d}{\cos i_1'} \quad (209)$$

значит,

$$e = \frac{d \sin(i_1 - i_1')}{\cos i_1'} \quad (210)$$

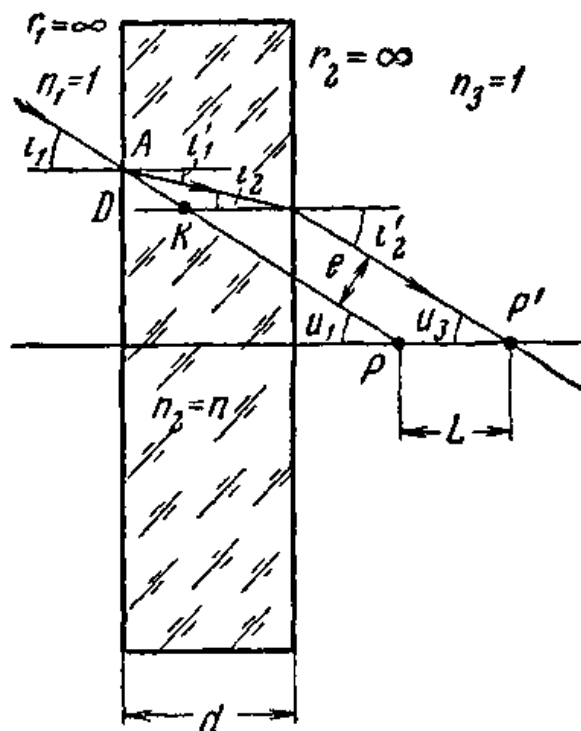


Рисунок 87 - Преломление луча через плоскопараллельную пластинку

После преобразования путем замены i'_1 , получим удобную формулу для определения $e = f(d, n, i_1)$

$$e = d \sin i_1 \left(1 - \frac{\cos i_1}{\sqrt{n^2 - \sin^2 i_1}} \right) \quad (211)$$

Формула (211) устанавливает связь между поперечным смещением e и углом поворота пластины i_1 .

Если пластина располагается в строго параллельном ходе лучей, то вызываемое ею смещение лучей в поперечном направлении и вдоль оптической оси не существенно.

Введение пластины в ход лучей оптического прибора, в область сходящихся или расходящихся пучков лучей, вызывает смещение изображения и нарушает ранее выполненную юстировку оптики прибора.

Оптическая деталь, ограниченная с двух сторон преломляющими плоскими поверхностями, составляющими друг с другом некоторый угол, называется **преломляющей призмой**.

Клином называется призма, ограниченная двумя преломляющими плоскостями с малым углом между ними. Клинья применяются в приборах для измерения углов (дальномеры), для юстировки оптических систем, для сведения окулярных осей и для решения других задач.

Под малым преломляющим углом понимается угол не более 6° .

Из рисунка 88 можно установить зависимость между преломляющим углом α и углом отклонения ω .

Принимая $\sin \sigma = \sigma$ и зная, что $i_2 = \sigma$ получим

$$\omega = (n - 1)\sigma \quad (212)$$

Для определения дисперсии клина в эту формулу подставим вместо n показатели преломления различных длин волн, тогда для лучей спектра **F** и **C** будем иметь

$$d\omega = \omega_F - \omega_C = (n_F - 1)\sigma - (n_C - 1)\sigma \quad (213)$$

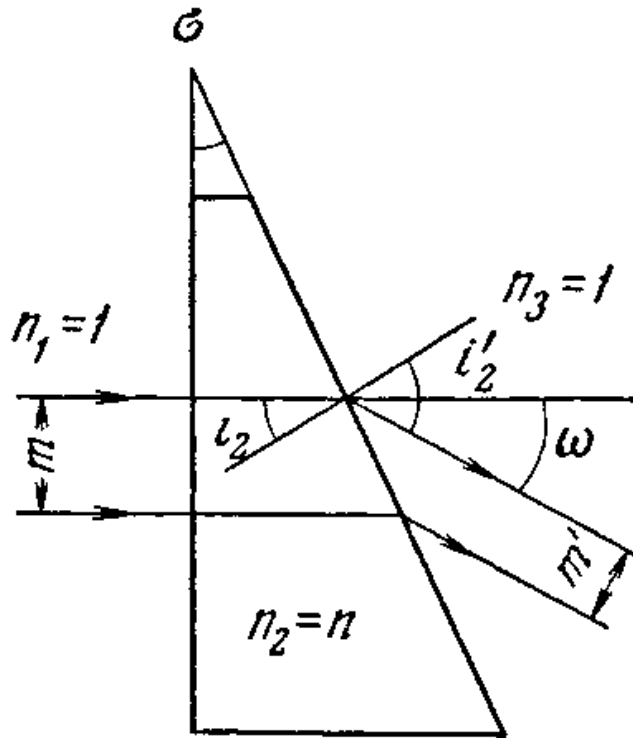


Рисунок 88 - Клин

После преобразования

$$d\omega = (n_F - n_C)\sigma \quad (214)$$

или в общем случае

$$d\omega = (n_{\lambda 1} - n_{\lambda 2})\sigma \quad (215)$$

При прохождении лучей через клин происходит сжатие пучка. Если перед клином размер пучка m (см. рисунок 88), то после преломления его размер m' .

Степень сжатия пучка определяется коэффициентом **анаморфирования** или коэффициентом **трансформирования**, который для призмы или системы призм выражается уравнением

$$A = \prod_{k=1}^{k=m} \frac{\cos i_k}{\cos i'_k} \quad (216)$$

Применение несферических поверхностей в оптических системах открывает новые возможности для достижения высокого качества изображения. Такие поверхности применяются в конденсорах для проекции и микроскопии, в фотографических объективах, в прожекторах и других приборах. Наиболее часто применяются параболические, эллиптические, гиперболические поверхности. Применяются и поверхности, удовлетворяющие уравнениям высшего порядка.

При определении положения изображения в параксиальной области несферические поверхности заменяют сферическими, но определение хода действительного луча в меридиональной плоскости требует особого метода вычисления.

Допустим, что кривая несферической поверхности с радиусом кривизны Γ_k в данной точке определяется уравнением $x=f(y)$, выраженным в прямоугольных координатах с центром в вершине несферической поверхности.

Несферическая поверхность с вершиной O_k расположена среди сферических поверхностей на расстоянии от последних d_{k-1} и d_k (см. рисунок 89).

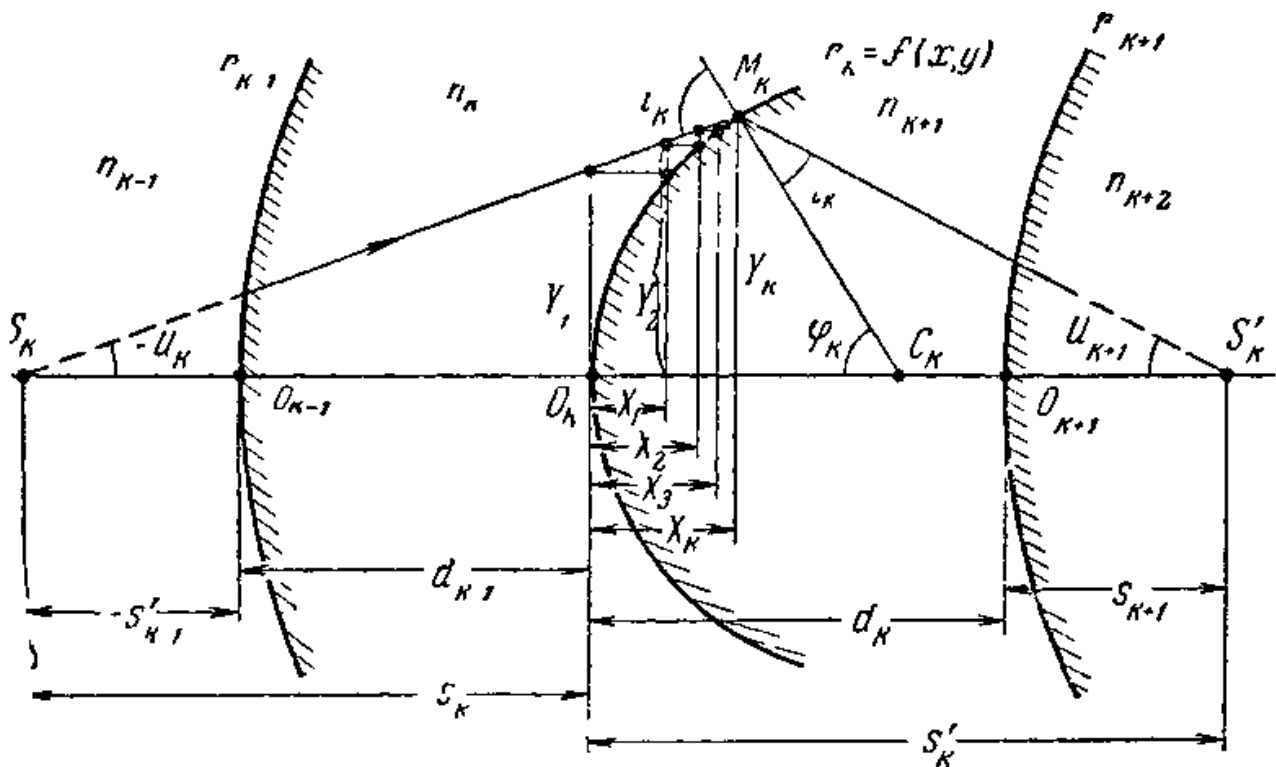


Рисунок 89 - Несферическая поверхность

Вычисление действительного луча в меридиональной плоскости через сферические поверхности производится по обычным схемам. Луч света $S_K M_K$ по выходе из поверхности с вершиной O_{k-1} имеет параметры $\mathbf{i}_k$ и s'_{k-1} .

Для несферической поверхности, заданной уравнением $x=f(y)$, начальными параметрами являются $\mathbf{n}_k$ и $s_k=s'_{k-1}-d_{k-1}$. Примем для анализа вид уравнения несферической поверхности

$$x = Ay^2 + By^4 + Cy^5 + Dy^8 + Ey^{10} + Fy^{12}. \quad (217)$$

Основным содержанием метода вычисления луча через несферическую поверхность является отыскание точки встречи луча несферической поверхности путем определения y , остающегося практически неизменными при изменении x .

Из рисунка 71 следует

$$y_1 = s_k \operatorname{tg} u_k \quad (218)$$

Ординате y_1 соответствует абсцисса x_1 определяемая уравнением

$$x_1 = Ay_1^2 + By_1^4 + Cy_1^6 + Dy_1^8 + Ey_1^{10} + Fy_1^{12} \quad (219)$$

Высоты луча, соответствующие абсциссам x , определяются из выражений:

$$\begin{aligned} y_2 &= y_1 - x_1 \operatorname{tg} u_k, \\ y_3 &= y_1 - x_2 \operatorname{tg} u_k \\ y_4 &= y_1 - x_3 \operatorname{tg} u_k \end{aligned} \quad (220)$$

и т.д.

Величины x_2, x_3 и т. д., соответствующие ординатам y_2, y_3 и т. д., определяются по уравнениям, аналогичным уравнению (219), до тех пор, пока величина y_k практически не окажется неизменной.

Практика вычислений показывает, что для шестичленного уравнения необходимое приближение достигается на 4-й или 5-й вариант расчета.

После отыскания точки встречи луча с поверхностью в виде ординаты y_k и абсциссы y_k определяется тангенс угла между оптической осью и касательной в точке встречи через первую производную. В нашем случае, учитывая вид уравнения $x=f(y)$, будем иметь

$$\operatorname{tg} \varphi_k = 2Ay_k + 4By_k^3 + 6Cy_k^5 + 8Dy_k^7 + 10Ey_k^9 + 12Fy_k^{11} \quad (221)$$

Из треугольника $S_k M_k C_k$ находим:

$$i_k = u_k - \varphi_k \quad (222)$$

Угол преломления находим из оптического инварианта

$$\sin i'_k = \frac{n_k \sin i_k}{n_{k+1}} \quad (223)$$

Из треугольника $S_k M_k S'_k$ находим угол u_{k+1} :

$$u_{k+1} = \varphi_k + i'_k \quad (224)$$

и, наконец,

$$s'_k = x_k + \frac{y_k}{\operatorname{tg} u_{k+1}} \quad (225)$$

Затем производится вычисление луча по обычным формулам сферической поверхности, для чего находим

$$s_{k+1} = s'_k - d_k \quad (226)$$

Величины s_{k+1} и u_{k+1} являются начальными параметрами для последующего вычисления через сферические поверхности.

Для изготовления несферических поверхностей известно много способов, а для контроля качества их изготовления уже применяются интерференционные методы, что позволит в ближайшем будущем широко применять несферические поверхности в оптических приборах.

2.4.3 Закон преломления света различными поверхностями

Рассмотрим преломление света линзой.

Линза с радиусами кривизны поверхностей R_1 и R_2 (см. рисунок 90), толщиной D , из стекла с показателем преломления n образует изображение бесконечно удаленной точки, расположенной на оптической оси линзы в точке F' , точке заднего фокуса. Определим фокусные расстояния и положения главных плоскостей в линзе.

Воспользуемся формулами:

$$f' = \frac{h_1}{\alpha_3}, \alpha_3 = \frac{n_2}{n_3} \alpha_2 + \frac{h_2(h_3 - h_2)}{n_2 r_3} \text{ и } h_2 = h_1 - \alpha_2 d_2 \quad (227)$$

В нашем случае $n_1 = n_3 = 1, n_2 = n$ и $\alpha_1 = 0$. Примем $h_1 = r$, тогда, подставив эти выражения в уравнение для α_3 , окончательно получим

$$\frac{1}{f'} = (n - 1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \frac{d(n - 1)^2}{n r_1 r_2} \quad (228)$$

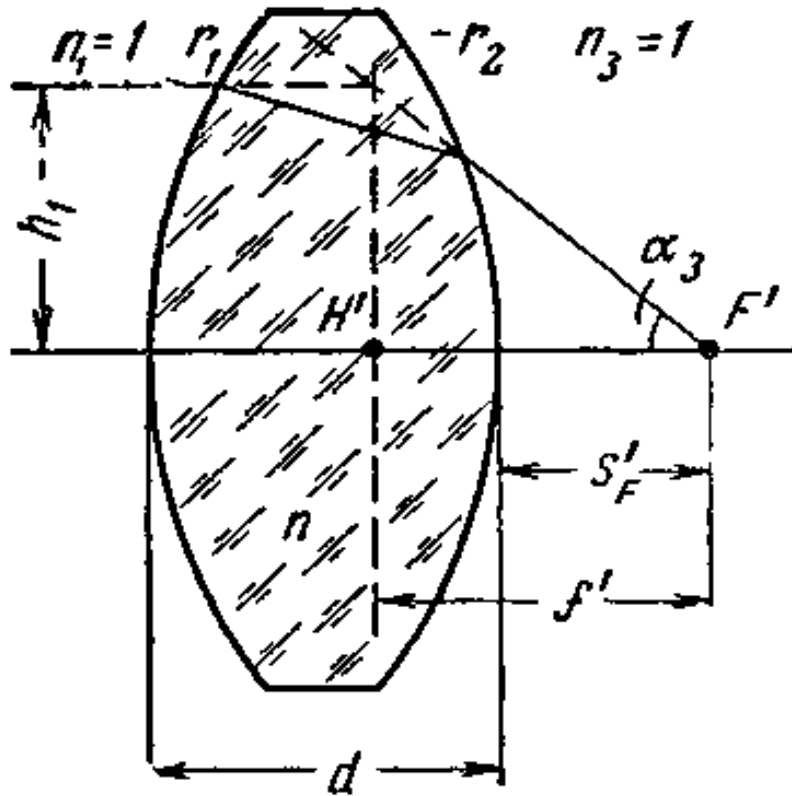


Рисунок 90 - Линза

Заднее вершинное фокусное расстояние s'_F найдется из выражения

$$\alpha_3 = \frac{h_2}{s'_F} \quad (229)$$

т. е. с учетом $h_2 = r_1 - \alpha_2 d$

$$s'_F = f' \left[1 - \frac{(n-1)d}{nr_1} \right] \quad (230)$$

и переднее вершинное фокусное расстояние аналогично

$$s_F = f' \left[1 + \frac{(n-1)d}{nr_2} \right] \quad (231)$$

Положение главных плоскостей S_H и S'_H найдется из выражений $S_H = S_F - F$ и $s'h = s'f - f$, т. е.

$$S_F = - \frac{f'(n-1)d}{nr_2} \quad (232)$$

$$s'_F = \frac{f'(n-1)d}{nr_1} \quad (233)$$

Рассмотрим типы линз

Линза есть оптическая деталь, ограниченная двумя преломляющими поверхностями, являющимися поверхностями тел вращения. Все линзы можно разделить на три группы.

Линзы, имеющие различные знаки радиусов кривизны поверхностей (биформа). К таким линзам относятся двояковыпуклые и двояковогнутые линзы (см. рисунок 91, а, б).

Линзы, имеющие одну из поверхностей плоской (планформа). Такие линзы называются плоско-выпуклыми или плоско-вогнутыми (см. рисунок 91, в, г).

Линзы, имеющие одинаковые знаки радиусов кривизны поверхностей. Такие линзы называют менисками (выпукло-вогнутыми или вогнуто-выпуклыми) (см. рисунок 91, д, е).

На рисунке 91 показаны положения главных точек и точек главных фокусов. У всех линз передняя главная плоскость находится перед задней.

Фокусные расстояния линз и положения главных плоскостей можно вычислить по формулам (228-233). С конструктивной стороны каждая линза характеризуется радиусами кривизны поверхностей r_1 и r_2 , толщиной D и показателем преломления n . Положительные линзы обычно толще в середине, а отрицательные — на краю. Поэтому малая толщина линз по краю характерна для положительных линз.

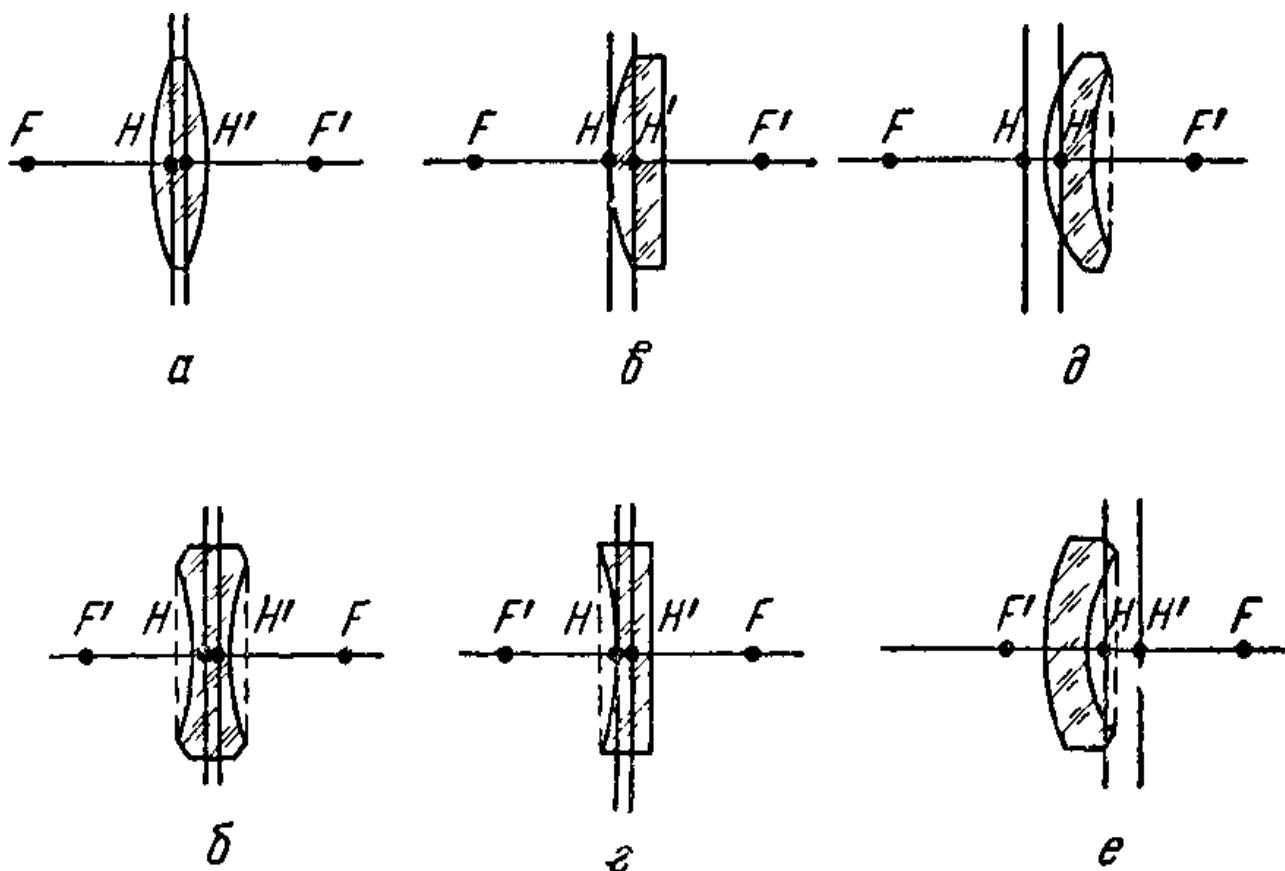


Рисунок 91 - Типы линз

Если толщина линзы слишком мала, то сферические поверхности образуют острый край. Такая линза называется линзой с острым краем. Ее диаметр можно найти по формуле

$$D_{\text{ок}} = 2\sqrt{2r_1h_1 - h_1^2} \quad (234)$$

где h_1 — стрелка прогиба поверхности, которая определяется выражением:

$$h_1 = \frac{d^2 + 2r_2d}{2(d - r_1 + r_2)} \quad (235)$$

Рассмотрим некоторые виды линз

Линза с равными радиусами разных знаков.

В формулу (228) подставим $r_1 = -r_2 = r$:

$$\frac{1}{f'} = \frac{2(n-1)}{r} - \frac{d(n-q)^2}{nr^2} \quad (236)$$

и окончательно

$$\frac{1}{f'} = \frac{n-1}{nr^2} (2nr - nd + d) \quad (237)$$

Такая линза может быть двояковыпуклой или двояковогнутой.

Линза с одной плоской поверхностью. Подставив в формулу (228) $r_2 = \infty$, получим

$$\frac{1}{f'} = \frac{n-1}{r} \quad (238)$$

В этом случае знак радиуса определяет знак фокусного расстояния. Формула (238) называется формулой плоско-выпуклой (или плоско-вогнутой) линзы.

Линза-шар. В шаровой линзе $r_1 = -r_2 = r$, и толщина линзы $D = 2r$. Подставив эти значения в формулу (228), получим

$$\frac{1}{f'} = \frac{2(n-1)}{nr} \quad (239)$$

Линза с равными радиусами одинаковых знаков. Такая линза относится к группе менисков. Подставив в формулу (228) $R_1 = R_2 = R$, получим

$$\frac{1}{f'} = \frac{d(n-q)^2}{nr^2} \quad (240)$$

Концентрическая линза. Концентрической линзой называется такая линза, у которой центры кривизны поверхностей находятся в одной точке. Такая линза обладает свойством пропускать лучи света без преломления, если они направляются в центр кривизны. Она относится к группе менисков. Ее фокусное расстояние всегда отрицательно. Формулу (228) преобразуем, подставив вместо D равную ей величину $R_1 - R_2$

$$\frac{1}{f'} = \frac{(n-1)(r_2 - r_1)}{r_1 r_2} + \frac{(n-1)^2(r_1 - r_2)}{n r_1 r_2} \quad (241)$$

или

$$\frac{1}{f'} = \frac{(n-1)(r_2 - r_1)}{n r_1 r_2} \quad (242)$$

и, наконец,

$$\frac{1}{f'} = \frac{n-1}{n} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (243)$$

Телескопическая линза. Телескопической линзой называется линза, фокусное расстояние которой равно бесконечности. Отсюда следует, что луч, направляющийся в линзу параллельно оптической оси, по выходе из линзы также идет параллельно оптической оси. Чтобы выполнить это условие, в формуле линзы (228) следует положить

$$(n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = - \frac{(n-1)^2 d}{n r_1 r_2} \quad (244)$$

В этом случае получим

$$r_2 = r_1 - \frac{(n-1)d}{n} \quad (245)$$

Если необходимо найти толщину линзы, удовлетворяющую условию фокусного расстояния, равного бесконечности, то при данных радиусах кривизны будем иметь

$$d = \frac{(r_1 - r_2)n}{n-1} \quad (246)$$

Линза относится к группе менисков.

Гиперболическая линза. Гиперболической линзой называется линза, у которой одна или обе поверхности являются гиперболическими. Наиболее часто применяется положительная плоско-выпуклая линза,

позволяющая получить гомоцентрический пучок лучей для бесконечно удаленной точки на оси оптической системы.

Уравнение поверхности определяется выражением

$$y^2 = x^2(n^2 - 1) - 2x(n - 1)f' \quad (247)$$

Такая линза своей плоской поверхностью обращена к предмету (X — отрицателен).

С ф е р о - э л л и п т и ч е с к а я л и н з а . Эллиптической линзой называется линза, у которой имеющаяся одна или обе поверхности являются эллиптическими. Такая линза также позволяет получить гомоцентрический пучок лучей в пространстве изображений, аналогично гиперболической линзе, но она обращена своей выпуклой эллиптической поверхностью к предмету. Вторая поверхность делается концентрической по отношению к точке заднего фокуса.

Если толщина линзы D , а заднее вершинное фокусное расстояние s'_F , то уравнение поверхности имеет следующий вид:

$$y^2 = 2(s'_F + d)x\frac{n-1}{n} - x^2\left(\frac{n^2-1}{n^2}\right) \quad (248)$$

$$r_2 = s'_F \quad (249)$$

Линза относится к группе менисков.

Реальная оптическая система дает изображение конечной величины при помощи достаточно широких пучков лучей. Попытки создать такую систему только на основе законов параксиальной области оказались бы неудачными, так как погрешности оптической системы, называемые абберациями, вызвали бы нерезкость в изображении и нарушение подобия предмету. Знание же сущности и теории аббераций позволяет, пользуясь приемами вычислительной оптики, создавать реальные оптические системы, которые всеми своими оптическими свойствами соответствуют оптическим системам, созданным на базе законов параксиальной области.

Для осуществления оптической системы необходимо знание всех конструктивных элементов системы. К конструктивным элементам относятся: радиусы кривизны поверхностей, толщины оптических деталей, воздушные промежутки, диаметры оптических деталей и оптические постоянные стекол. Эти элементы становятся известными после окончания корригирования системы на абберации. Предварительное определение габаритов системы (диаметров и длин) в преобладающем числе случаев не требует абберационного расчета. Определить фокусные расстояния компонентов системы, их расстояния друг от друга и диаметры световых отверстий становится возможным при помощи законов, выведенных для параксиальной области, стоит только предположить, что система идеальна в отношении аббераций.

Первоначально создают оптическую систему, дающую изображение заданной величины в виде комбинаций отдельных оптических узлов определенного диаметра, отстоящих друг от друга на некотором расстоянии. Затем приемами вычислительной оптики обосновываются значения радиусов кривизны поверхностей, толщин и оптических постоянных оптических деталей, удовлетворяющих требуемому качеству изображения.

Оптическая система, свободная от аберраций, дающая изображение конечной величины при помощи широких пучков, называется идеальной оптической системой. Теория идеальной оптической системы основана на следующих положениях:

- в пространстве предметов и в пространстве изображений существуют
- соответственные точки. Каждой точке в пространстве предметов
- соответствует одна и только одна точка в пространстве изображений.

В пространстве предметов и в пространстве изображений существуют соответственные линии. Каждой линии в пространстве предметов соответствует одна и только одна линия в пространстве изображений.

Если в пространстве предметов какая-нибудь точка лежит на прямой, то в пространстве изображений соответствующая ей точка также лежит на прямой, соответствующей прямой в пространстве предметов. Такие точки и прямые называются сопряжёнными.

Вместо точки можем представить себе источник света, или точку предмета, а вместо прямых — лучи, тогда получим гомоцентрический пучок в пространстве предметов, которому будет соответствовать ему сопряженный, гомоцентрический пучок в пространстве изображений.

Для определения положения точки изображения необходимо из сопряженной точки предмета в оптическую систему направить два луча. В месте их пересечения по выходе из системы и будет располагаться точка изображения. Оптическая система располагается в однородной среде и показывается в виде главных плоскостей.

Для нахождения положения изображения применяют несколько приемов.

Прием первый. Из точки предмета вне оптической оси в оптическую систему направляют два луча. Первый луч направляется параллельно оптической оси. Этот луч по выходе из системы должен пройти через точку заднего фокуса. Второй луч направляется через точку переднего фокуса. По выходе из системы этот луч должен пойти параллельно оптической оси. Рисунок 92 иллюстрирует построение изображения первым приемом. Предмет I расположен перед отрицательной (рассеивающей) линзой. Каждый луч входит в линзу на передней главной плоскости на определенной высоте и на такой же высоте выходит из задней главной плоскости, так как линейное увеличение в главных плоскостях равно единице. В пространстве изображений пересекаются только продолжения вышедших лучей. Из точки пересечения продолжений лучей опустим нормаль на оптическую ось, которая и будет мнимым уменьшенным изображением.

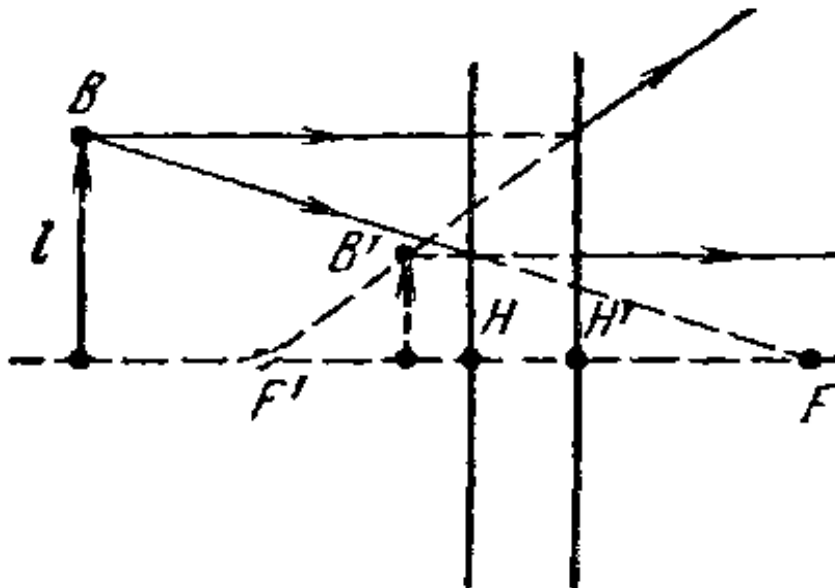


Рисунок 92 - Построение изображения. Предмет расположен перед оптической системой

Прием второй. Из точки предмета вне оптической оси в систему также направляются два луча и один из них направляется параллельно оптической оси, а другой направляется в переднюю главную точку. Здесь используется свойство главных точек оптической системы, расположенной в однородной среде, образующих одинаковые углы луча с осью ($\gamma = +1$).

Предмет расположен (см. рисунок 93) за положительной оптической системой. В точку B из пространства предметов (слева направо) направляются два луча — один из них идет параллельно оптической оси, а второй направляется через переднюю главную точку. Получили действительное и уменьшенное изображения.

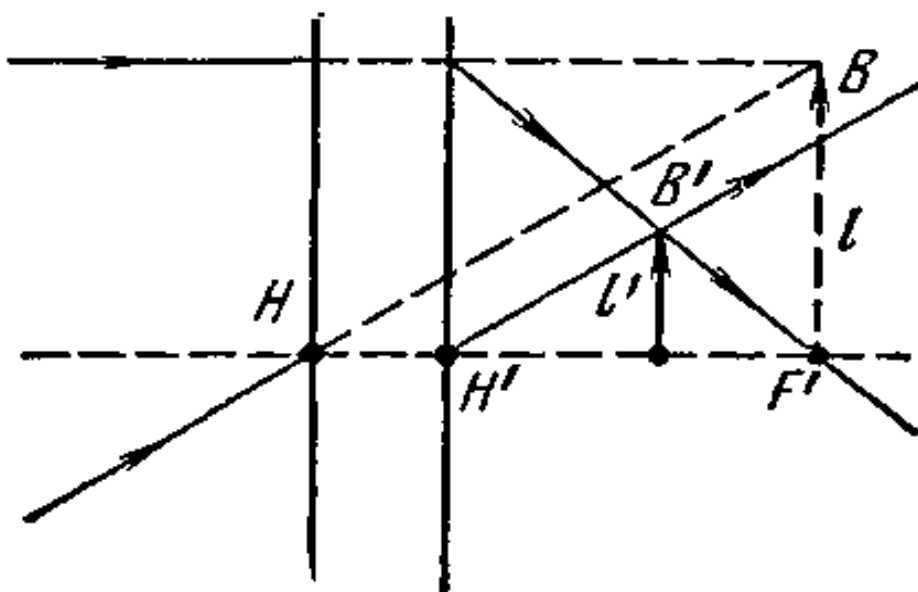


Рисунок 93 - Построение изображения. Предмет расположен за оптической системой

Прием третий. Из точки предмета вне оптической оси в систему направляются два луча - один из них направляется в переднюю главную точку, а другой - в передний фокус. На рисунке 94 предмет l расположен в заднем фокусе отрицательной линзы. Лучи, вышедшие из точки B , после преломления в линзе образуют изображение l' . Изображение получилось мнимое и уменьшенное.

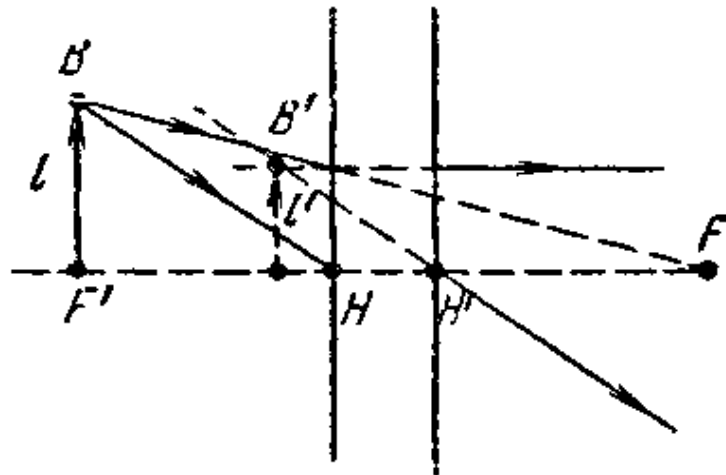


Рисунок 94 - Построение изображения. Предмет расположен в заднем фокусе оптической

Оптическая система (см. рисунок 95) представлена в виде системы главных плоскостей H и H' . Предмет l , расположенный в точке A находится на расстоянии x от точки переднего фокуса. Изображение l' графически определяется пересечением в пространстве изображения двух лучей, один из которых выходит из точки B и идет параллельно оптической оси, а другой направляется в точку переднего фокуса F . По выходе из системы первый луч должен пройти через точку заднего фокуса F' , а другой - параллельно оптической оси. Оба луча пересекаются в точке B' и образуют изображение l' .

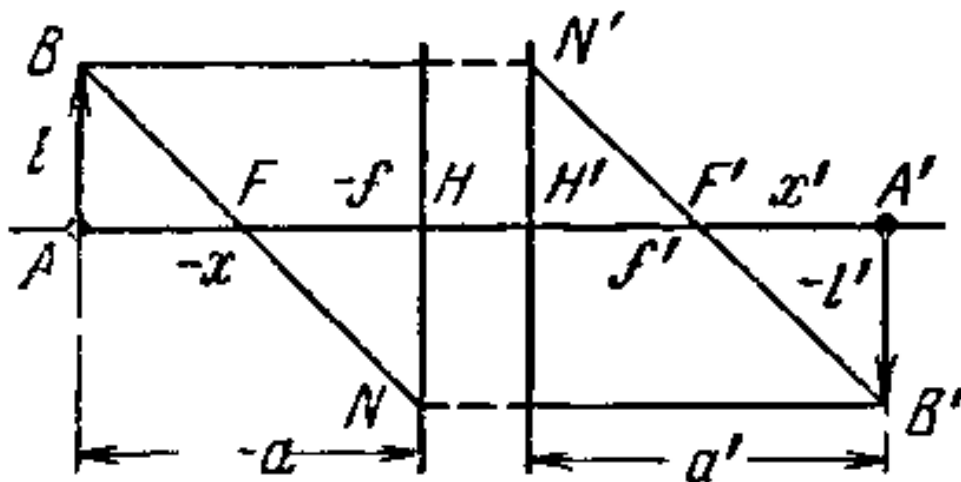


Рисунок 95 - К выводу формулы Ньютона

Из подобия треугольников BAF и FHN следует

$$\frac{l'}{l} = -\frac{f}{x} \quad (250)$$

Аналогично из подобия треугольников $N'H'F'$ и $F'A'B'$

$$\frac{l'}{l} = -\frac{f}{x} \quad (251)$$

Отсюда получаем выражение, называемое формулой Ньютона:

$$xx' = ff' \quad (252)$$

Если оптическая система находится в однородной среде, то $f = f'$ и вместо уравнения (252) имеем

$$xx' = -f'^2 \quad (253)$$

Из выражений (250) и (251) получаем формулы линейного увеличения идеальной оптической системы

$$\beta = -\frac{f}{x} \quad (254)$$

$$\beta = -\frac{x'}{f'} \quad (255)$$

Согласно рисунку 95, имеем $x = A - f$ и $x' = A' - f'$. Подставляя эти выражения в формулу (252) и раскрывая скобки, получим

$$\frac{f'}{a'} + \frac{f}{a} = 1 \quad (256)$$

Кроме того, учитывая $\gamma = \frac{n_1}{n_{k+1}} \cdot \frac{1}{\beta}$,

$$\beta = \frac{n_1 a'}{n_{\text{пост}} a} \quad (257)$$

Если система находится в однородной среде, то выражение (256) принимает вид формулы, известной под названием формулы отрезков:

$$-\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{f'} \quad (259)$$

а из (257) получим

$$\beta = \frac{a'}{a} \quad (260)$$

Подставив выражение (260) в (259), получим

$$a = \frac{(1-\beta)f'}{\beta} \quad (261)$$

$$a' = (1 - \beta)i' \quad (262)$$

Формулы (259-262) справедливы при $f=f'$.

Оптическая система (см. рисунок 96) представлена в виде главных точек H и H' .

Ее оптическая ось A_1A_2' . Перед системой в точке A_1 расположен предмет, а в точке A_2 его изображение. Если предмет передвинется в сторону системы на расстояние Δx и окажется в точке A_2 , его изображение переместится в точку A'_2 на расстояние $\Delta x'$ от точки A' . Точки A_1 и A'_1 , а также A_2 и A'_2 являются точками сопряжёнными. Найдём отношение $\Delta x'$ к Δx . Предел отношения $\Delta x'$ к Δx , когда Δx стремится к нулю, называется продольным увеличением в данной паре сопряженных точек

$$\alpha = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta x'}{\Delta x} \right) = \frac{dx'}{dx} \quad (263)$$

Дифференцируя $xx' = ff'$ по x и x' , получим

$$x dx' + x' dx = 0, \quad (264)$$

или

$$\alpha = \frac{dx'}{dx} = -\frac{x'}{x} \quad (100 \ 265)$$

Из (255) и (256) выделим x и x' и подставим их в формулу (265)

$$\alpha = -\frac{f'}{f} \beta^2 \quad (266)$$

Заменим отношение фокусных расстояний по формуле $\frac{f}{f'} = -\frac{n'}{n}$

$$\alpha = \frac{n'}{n} \beta^2 \quad (267)$$

Отсюда следует, что продольное увеличение пропорционально квадрату линейного.

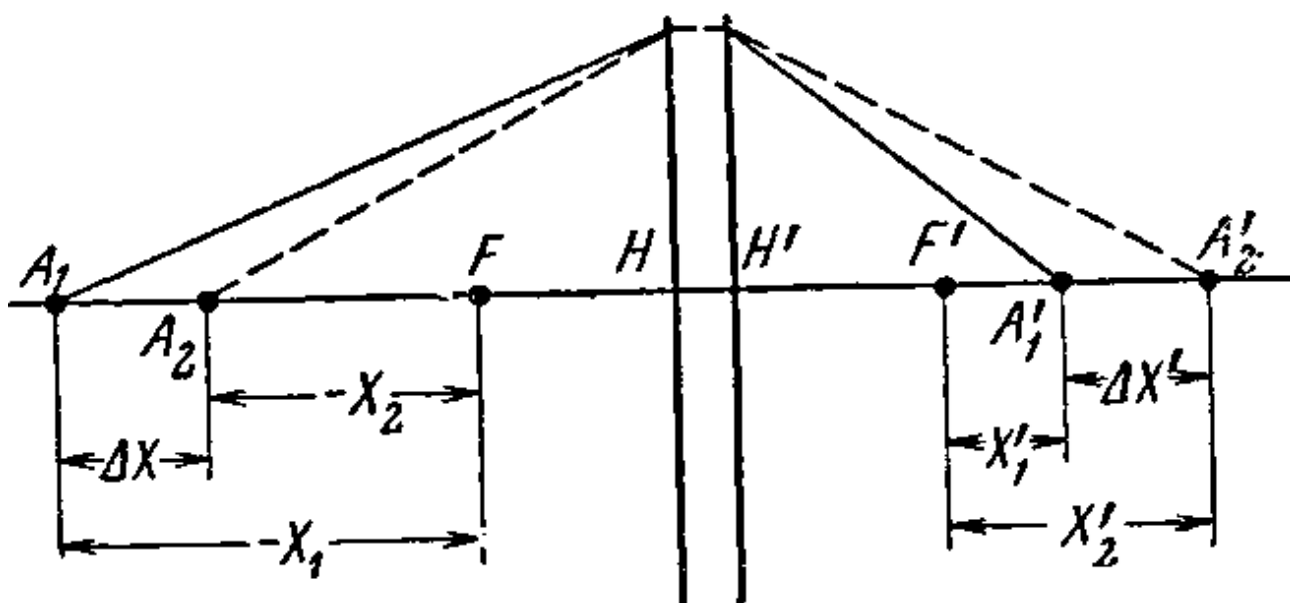


Рисунок 96 - К выводу формулы продольного увеличения

Ранее была получена формула $\gamma = \frac{n_1}{n_{k+1}} \cdot \frac{1}{\beta}$, устанавливающая связь между линейным и угловым увеличением.

Найдем из этой формулы отношение показателей преломления и подставим в формулу (268). Тогда окончательно получим связь между продольным, линейным и угловым увеличением

$$\alpha\gamma = \beta \quad (268)$$

Теперь перейдём к рассмотрению тонкой линзы и системы линз.

Если в реальной толстой линзе толщина мала по сравнению с радиусами кривизны преломляющих поверхностей, то такая линза называется тонкой. Главные плоскости тонкой линзы совпадают.

Представим себе систему из трех тонких линз с главными точками H_1 , H_2 и H_3 (см. рисунке 97), расположенными друг от друга на расстояниях D_1 и D_2 .

Направим в систему луч под углом $\alpha=0$. По известному правилу графического определения положения главных плоскостей найдем положение эквивалентной задней главной плоскости H_3' . Расстояние $H_3'F'=f_3'$ равно эквивалентному заднему главному фокусному расстоянию сложной системы из трех тонких линз.

Все сложные оптические системы, а в практике главным образом с ними и приходится встречаться, можно представить в виде систем тонких линз. Рассмотрим основные признаки таких систем. Все реальные оптические системы классифицированы по признакам положения предмета и изображения.

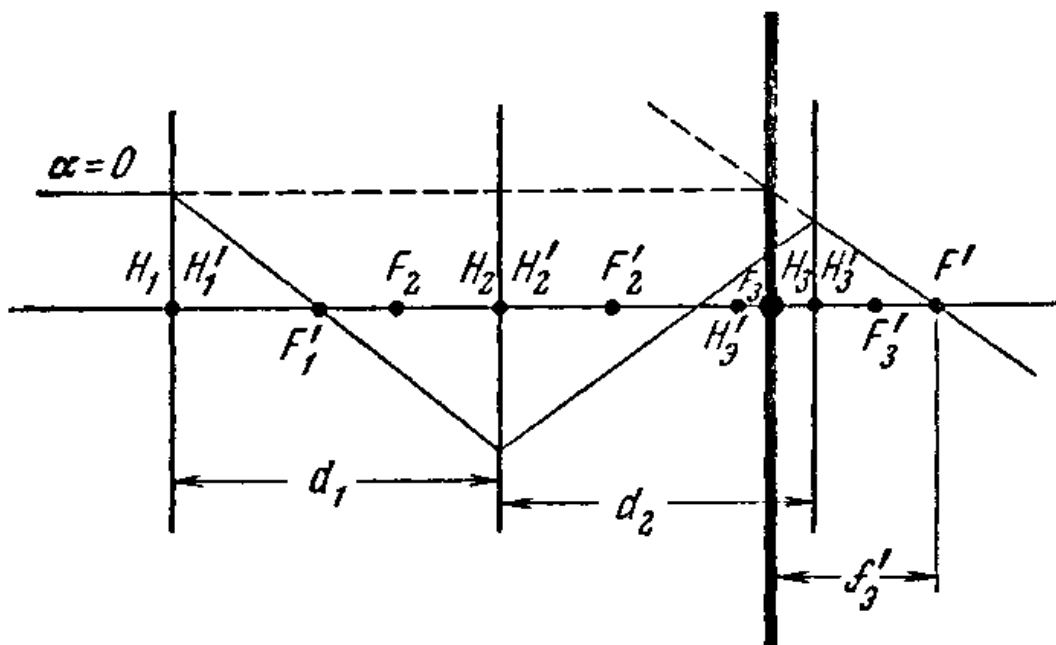


Рисунок 97 - Система тонких линз

Предмет расположен в бесконечности ($-\infty$), а изображение находится на конечном расстоянии. Примером такой системы является фотографический объектив (см. рисунок 98, а). К этим системам относятся любые сложные оптические приборы, предназначенные для наблюдения или фотографирования бесконечно удаленных предметов, при условии, что в пространстве изображений изображение располагается на конечном расстоянии от системы. Это изображение или фотографируется с помощью светочувствительного материала, или непосредственно рассматривается на матовой поверхности наблюдателем, или передается по электронно-оптическому тракту. Такие системы будем называть фотографическими.

Предмет расположен в бесконечности ($-\infty$). Изображение находится также в бесконечности ($+\infty$). Примером такой системы является зрительная труба (см. рисунок 98, б). К этим системам относятся любые сложные оптические приборы, предназначенные для визуального наблюдения бесконечно удаленных предметов. К их числу относится большая группа военных и геодезических наблюдательных приборов: бинокли, стереотрубы, прицелы, дальномеры, перископы, нивелиры, теодолиты и др. Системы подобного рода называются телескопическими, или афокальными.

Предмет расположен на конечном расстоянии, а изображение — в бесконечности ($+\infty$). Примером такой системы является микроскоп (см. рисунок 98, в). К этим системам относятся любые сложные оптические приборы, предназначенные для визуального наблюдения близко расположенных предметов. К их числу относится большая группа различных микроскопов: отсчетных, биологических, поляризационных, а также

фотограмметрические приборы: стереометры, компараторы, стереопланиграфы. Такие системы называются системами микроскопа.

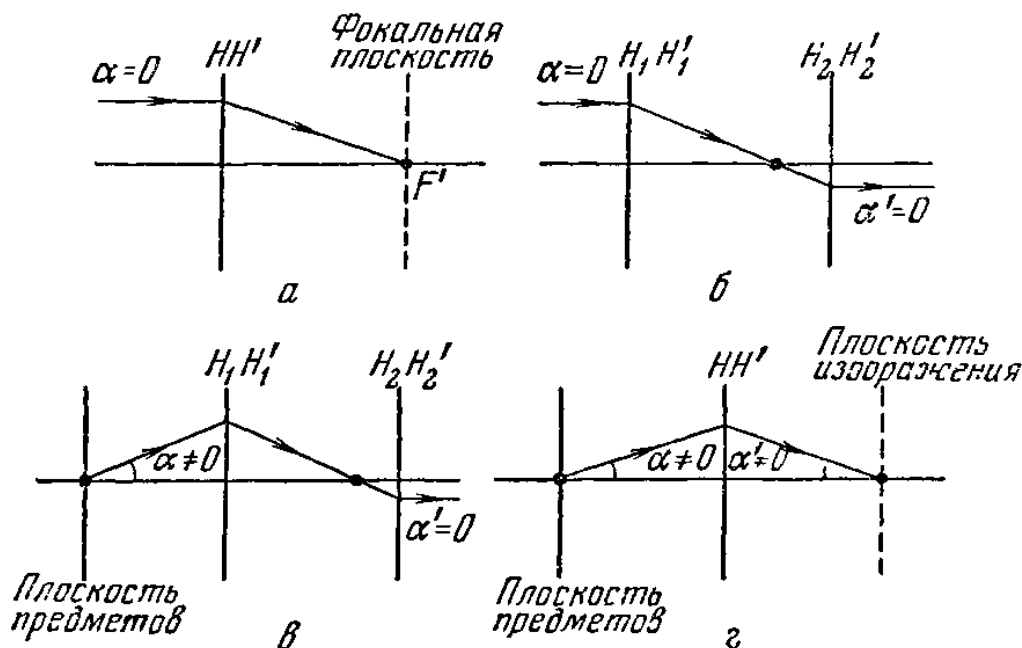


Рисунок 98 - Типы оптических систем: а — фотографический объектив; б — телескопическая система; в — система микроскопа; г — проекционная и репродукционная система

Предмет расположен на конечном расстоянии и изображение также находится на конечном расстоянии. Примерами такой системы являются проекционный объектив и фоторепродукционный объектив (см. рисунок 98, г). К этим системам относятся любые сложные оптические приборы, предназначенные для наблюдения или фотографирования предметов, расположенных на конечном расстоянии, при условии, что в пространстве изображений изображение располагается на конечном расстоянии от системы. Это изображение или фотографируется на светочувствительном материале, или рассматривается на экране. Экраном может быть и матовое стекло.

В зависимости от характера приема изображения такие системы называются проекционными, или репродукционными. К числу проекционных систем относятся все виды кинопроекционных аппаратов, диаскопы, эпископы, эпидиаскопы, проекционные аппараты для контроля деталей в машиностроении и др. К числу репродукционных систем относятся фотографические репродукционные аппараты, ультрафоты, фотоувеличители и др.

К этим четырём группам можно свести все разнообразие оптических приборов. Есть приборы, которые имеют устройства ряда таких групп. Эти четыре группы приборов имеют свои отличительные свойства, теорию и особенности. Осветительные устройства всех этих систем не влияют на их классификацию.

Найдём оптическую силу оптической системы.

Фокусное расстояние оптической системы или его обратная величина являются мерой оптического действия системы. Из уравнения $\frac{f}{f} = -\frac{n'}{n}$ следует

$$-\frac{n}{f} = \frac{n'}{f'} \quad (269)$$

Эти отношения определяют оптическую силу системы.

Оптическое действие системы проявляется двояко.

Во-первых, чем больше оптическая сила, тем ближе к системе расположено изображение, во-вторых, чем больше оптическая сила, тем меньше величина изображения.

Большей частью оптическую систему рассматривают в воздухе, тогда $n=n'=1$, и за оптическую силу системы линз принимают величину, обратную заднему фокусному расстоянию:

$$\Phi = \frac{1}{f'} \quad (270)$$

Единицей оптической силы является диоптрия. Одна диоптрия есть оптическая сила системы (линзы) в воздухе с фокусным расстоянием, равным одному метру.

Выразив фокусное расстояние в миллиметрах, получим

$$\Phi = \frac{1000}{f'} \quad (271)$$

Например, линза с фокусным расстоянием 50 мм имеет оптическую силу в 20 дптр (диоптрий).

Обычно не принято сложные оптические системы или объективы и окуляры в приборах характеризовать оптической силой в диоптриях. Характеристика линз в диоптриях принята в очковой оптике. Очковые линзы находят себе применение и в оптических приборах и в исследованиях различного рода. В этом случае линзы получают наименование диоптрийных.

Формула углов

Точка A расположена на оптической оси системы с главными плоскостями HH' (см. рисунок 99). Ее изображением является точка A' . Установим зависимость между углами α и α' .

Из рисунка 99 следует

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{h}{a} \text{ и } \operatorname{tg} \alpha' = \frac{h}{a'} \quad (272)$$

Из этих выражений найдём a и a' и подставим в формулу (252). Получим

$$\frac{f \operatorname{tg} \alpha}{h} + \frac{f' \operatorname{tg} \alpha'}{h} = 1 \quad (108\ 273)$$

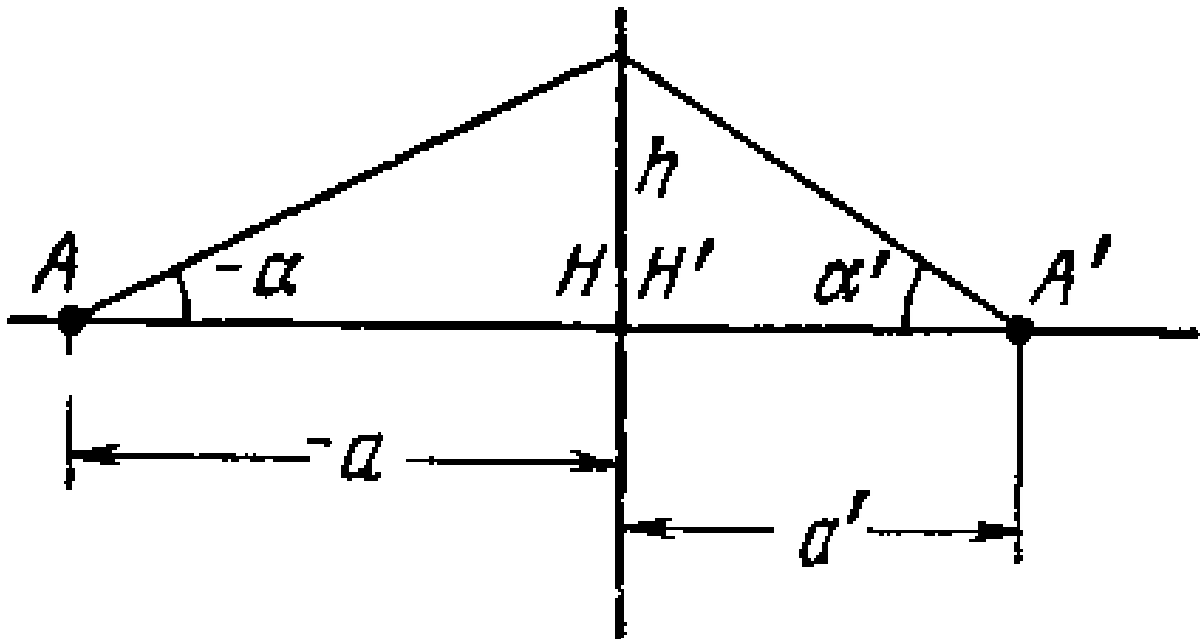


Рисунок 99 - К выводу формулы углов тонкой системы

Разделив все члены последнего уравнения на f' и подставив формулу (256), получим

$$\operatorname{tg} \alpha' = -\frac{f}{f'} \operatorname{tg} \alpha + h\Phi \quad (274)$$

или в общем случае

$$\operatorname{tg} \alpha_{k+1} = -\frac{f_k}{f'_{k+1}} \operatorname{tg} \alpha_k + h_k \Phi_k \quad (275)$$

В этом выражении отношение фокусных расстояний заменим, воспользовавшись уравнением $\frac{f}{f'} = -\frac{n'}{n}$, отношением показателей преломления

$$\operatorname{tg} \alpha_{k+1} = -\frac{n_k}{n_{k+1}} \operatorname{tg} \alpha_k + h_k \Phi_k \quad (276)$$

Найдём оптическую силу двух систем.

Две системы с оптическими силами Φ_1 и Φ_2 расположены на одной оптической оси OO' на расстоянии d друг от друга (см. рисунок 100).

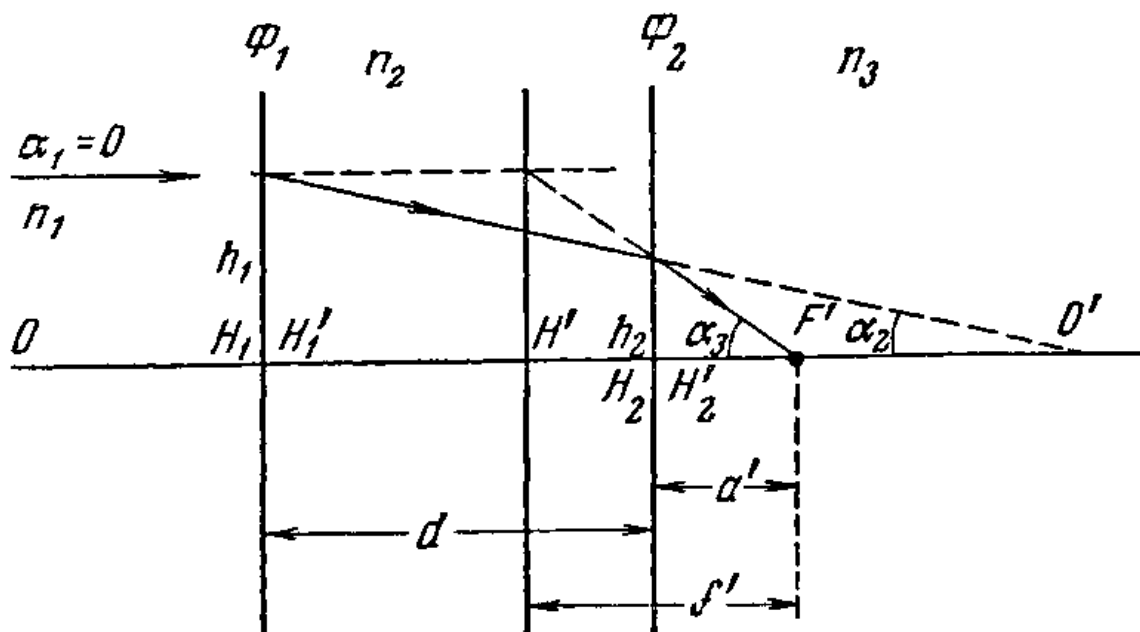


Рисунок 100 - К выводу формул оптической силы двух систем

Общее фокусное расстояние обеих систем F называется эквивалентным фокусным расстоянием.

В соответствии с формулой $f' = \frac{h}{tg \alpha'}$ имеем

$$\Phi = \frac{1}{f'} = \frac{tg \alpha_3}{h_1} \quad (277)$$

Так как $\alpha_1 = 0$, то, применяя формулу углов (276) и формула будем иметь

$$tg \alpha_2 = h_1 \Phi_1 \quad (278)$$

и

$$h_2 = h_1 - tg \alpha_2 d = h_1(1 - \Phi_1 d) \quad (279)$$

и далее с учетом $n_3 = 1$,

$$tg \alpha_3 = \frac{n_2}{n_3} tg \alpha_2 + h_2 \Phi_2 = n_2 h_1 \Phi_1 + h_1(1 - \Phi_1 d) \Phi_2 \quad (280)$$

Подставив последнее выражение в уравнение (277), получим основное уравнение

$$\Phi = n_2 \Phi_1 + \Phi_2 - d \Phi_1 \Phi_2 \quad (281)$$

Если каждая оптическая система находится в однородной среде, то

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 - d\Phi_1\Phi_2 \quad (282)$$

Расстояние от системы до точки заднего фокуса найдем по формуле

$$a' = \frac{h_2}{\operatorname{tg} \alpha_3} \quad (283)$$

Подставив в последнюю формулу выражения (279) и (280), получим

$$a' = \frac{1 - \Phi_1 d}{\Phi} \quad (284)$$

2.4.4 Оптические приборы на примере микроскопа и телескопа

Для того чтобы нормальный глаз человека мог рассмотреть изображение, образованное оптической системой, без напряжения аккомодации, необходимо, чтобы из системы лучи выходили в виде параллельных пучков. Эту роль выполняет последняя линзовая система прибора, называемая окуляром. При помощи окуляра глаз рассматривает изображение, образованное предшествующими окуляру частями оптической системы. Окуляр как бы выполняет роль лупы. Только через лупу рассматривают предметы непосредственно, а через окуляры — изображение предметов.

Окуляр характеризуется следующими величинами: 1) фокусным расстоянием 2) видимым увеличением; 3) полем зрения; 4) диаметром выходного зрачка; 5) положением выходного зрачка; 6) расстоянием от рассматриваемого предмета (изображения) до первой поверхности 5. Принципиальная оптическая схема окуляра показана на рисунке 101.

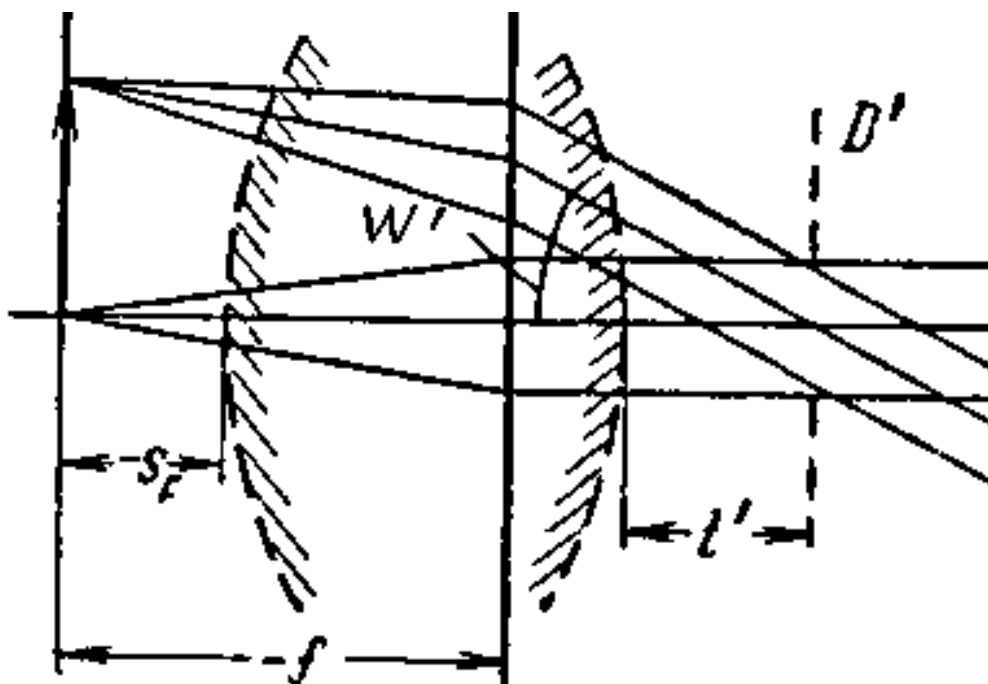


Рисунок 101 - Окуляр

Поверхности окуляра показаны пунктиром. Предмет расположен в плоскости изображений (передняя фокальная плоскость окуляра). Глаз наблюдателя устанавливается в центре выходного зрачка. Условие наблюдения требует достаточного удаления выходного зрачка от окуляра, чтобы все пучки лучей попали в зрачок глаза. Расстояние S_F имеет значение в случае расположения сетки в передней фокальной плоскости окуляра или призмы между передней фокальной плоскостью и первой поверхностью окуляра. Для фокусировки на резкость изображения сетки необходимо изменять расстояние между сеткой и окуляром, а малое S_F не позволяет разместить призму в этом пространстве.

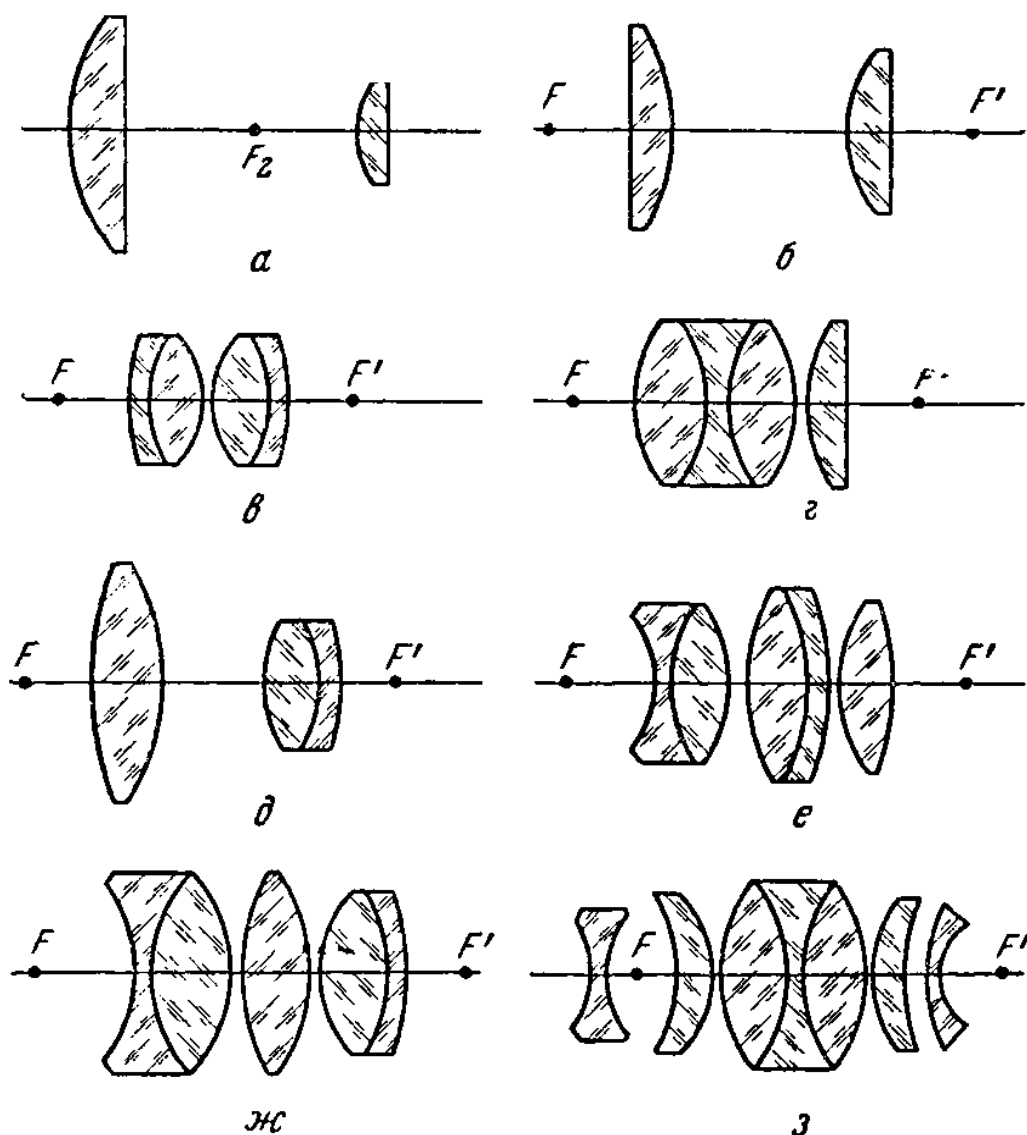


Рисунок 102 - Типы окуляров: а — окуляр Гюйгенса, $2w=30^\circ$; б — окуляр Рамсдена, $2w=30^\circ$; в — симметричный окуляр, $2w=40^\circ$; г — ортоскопический окуляр, $2w=40^\circ$; д — окуляр Кельнера, $2w=45^\circ$; е — окуляр с удаленным зрачком, $2w=50^\circ$; ж — окуляр Эрфле, $2w=60^\circ$; з — широкоугольный окуляр, $2w=88^\circ$

Простейшим окуляром может быть простая линза. Но она редко применяется без коллектива. Поэтому, как минимум, каждый окуляр состоит из двух линз. Первая линза со стороны передней фокальной плоскости окуляра называется коллективом, а со стороны глаза — глазной. Эти наименования сохранились и для более сложных окуляров.

В тех случаях, когда поле зрения не превосходит $2\omega'=30^\circ$, рекомендуется применять окуляры, состоящие из двух плосковыпуклых линз.

Наиболее распространенные конструкции окуляров показаны на рисунке 102.

Наиболее простые, состоящие из двух линз окуляры Гюйгенса и Рамсдена. Окуляр Гюйгенса - линзы плоской стороной обращены к наблюдателю, и плоскость изображения, образованная предыдущей системой, расположена между линзами. Такие окуляры обычно применяются в микроскопах. Их достоинством является сокращение длины системы, а недостатком — затруднения в установке сетки в фокальной плоскости. Окуляр Рамсдена - одинаковые плоско-выпуклые линзы обращены выпуклыми сторонами друг к другу.



Рисунок 103 - Общий вид микроскопа «Биолам 70-PIV.4.2»

Окуляр в приборе обычно имеет некоторое перемещение (фокусировку) вдоль оптической оси с целью приспособления к недостаткам глаз наблюдателя в пределах до ± 7 диоптрий. Фокусировка окуляра позволяет близорукому или дальновзоркому глазу производить наблюдение без напряжения. Для близорукого глаза окуляр вдвигается, а для дальновзоркого выдвигается.

Оптическая система, предназначенная для наблюдения близко расположенных предметов в увеличенном виде, называется микроскопом. Следует отметить, что простейшим микроскопом является лупа. Однако для увеличения свыше $12\times$ применяют микроскоп.

Микроскоп является сложной оптической системой, состоящей, как минимум, из объектива и окуляра. Объектив (см. рисунок 103, 104) проектирует изображение в переднюю фокальную плоскость окуляра. В этой плоскости создается промежуточное действительное обратное изображение рассматриваемого предмета, позволяющее совместить с ним какую-либо шкалу или сетку. Шкала (сетка) видна одновременно с рассматриваемым предметом (применяется в отсчетном, шкаловом, измерительном микроскопах). При создании микроскопов выходящие пучки лучей из окуляра микроскопа рассматривают как параллельные.

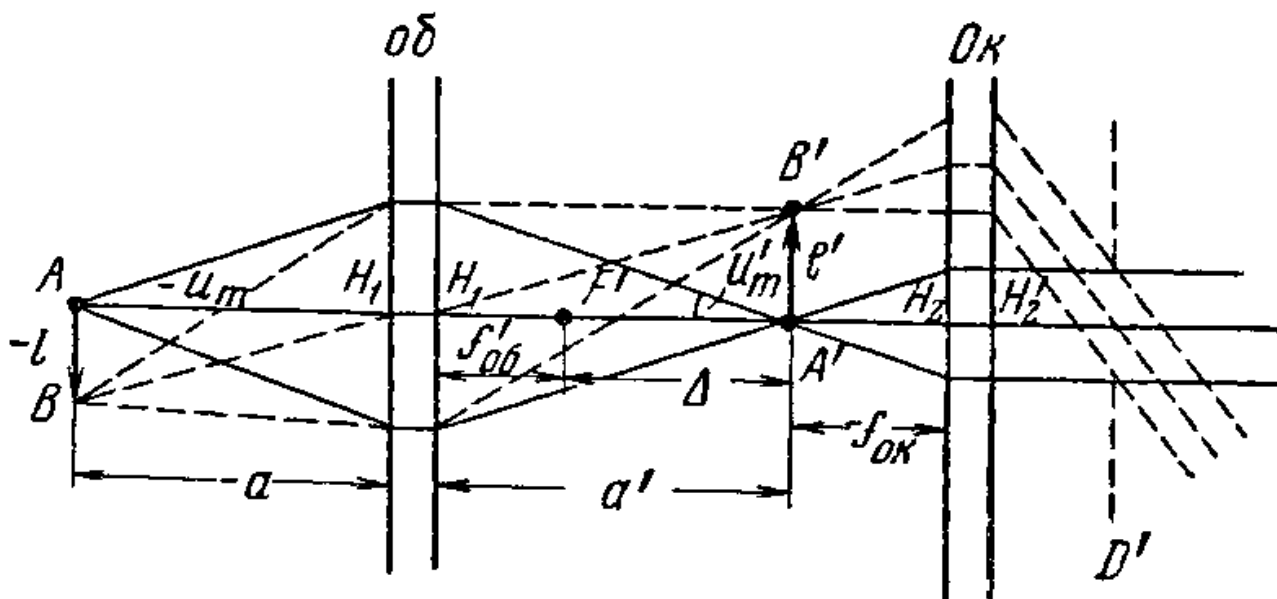


Рисунок 104 - Оптическая схема тубуса микроскопа

Если отдельно выполнить наводку на резкость в микроскоп и в зрительную трубу на бесконечно удаленные предметы и приставить затем последнюю объективом к окуляру микроскопа, то увидим резкие изображения, и они снова будут казаться как бы находящимися перед наблюдателем. Поэтому при создании оптических приборов типа микроскопа (стереометры, компараторы и т. п.) плоскость изображения после всей предшествующей окуляру оптической системы совмещают с передней фокальной плоскостью окуляра.

Зрачок входа на рисунке 86 совпадает с объективом. В действительности в микроскопах зрачок входа может быть и перед объективом и позади его.

Микроскоп характеризуется:

- видимым увеличением Γ
- полем зрения $2l$
- апертурой A

Объектив с линейным увеличением β образует действительное изображение величиной $2l'$. Это изображение рассматривается при помощи окуляра, работающего подобно лупе, с определенным увеличением. Следовательно, видимое увеличение микроскопа равняется произведению видимого увеличения окуляра на линейное увеличение объектива.

Поле зрения микроскопа ограничивается полем зрения окуляра. Величина изображения l определяется выражением:

$$2l = \frac{500 \operatorname{tg} w'}{\Gamma} \quad (285)$$

где w' — наиболее допустимый угол в пространстве изображений.

Апертура характеризует светосилу микроскопа и его разрешающую способность. Под числовой апертурой понимают произведение показателя преломления среды, в которой помещен предмет, на синус апертурного угла

$$A = n_1 \sin u_m \quad (286)$$

Из рисунка 86 можно установить зависимость между апертурой, диаметром выходного зрачка и видимым увеличением. Положим $n_1 = 1$ и $u_m = A$. Тогда

$$D' = \frac{500 A}{\Gamma} \quad (287)$$

Оптическая среда, которая заполняет пространство между наблюдаемым предметом и объективом, называется *иммерсией*. В качестве иммерсии применяют воду, глицерин, можжевельное масло или монобромнафталин.

Дифракционная теория образования изображений позволяет указать пределы разрешения предметов, расположенных на конечном расстоянии от оптической системы. Наименьший предмет или деталь объекта, разрешаемые в микроскопе, определяются уравнением

$$\delta = \frac{\lambda}{2A} \quad (288)$$

Разрешающая способность оптической системы типа микроскопа пропорциональна апертуре A . Апертура микроскопа позволяет определить ожидаемую разрешающую способность. Наибольшая достигнутая величина апертуры составляет $A=1,6$, что при наблюдении в видимых лучах спектра (λ

$=0,55 \text{ мкм})$ позволяет получить предельно маленькое расстояние между двумя рассматриваемыми точками в $0,17 \text{ мкм}$. Чтобы отдельно рассмотреть такие точки, необходимо обеспечить соответствующее видимое увеличение микроскопа, называемое *полезным*. Оно учитывает разрешающую силу глаза от $2'$ до $4'$ и определяется выражением

$$500A < \Gamma_{\Pi} < 1000A \quad (289)$$

Таким образом, разумный предел наибольшего увеличения микроскопа при $A=1,6$ составляет $1600^{\times}$. В практике большей частью создают микроскопы, позволяющие получать увеличение до $1350^{\times}$. В особых случаях оно достигает $3500^{\times}$.

Длина микроскопа L главным образом зависит от фокусного расстояния объектива:

$$L = a' + f_{ок} \quad (290)$$

Опыт многих лет показал, что так называемая механическая длина тубуса микроскопа должна быть в пределах от 160 до 190 мм. Механической длиной тубуса называется расстояние между опорными плоскостями: с одной стороны (снизу), оправой объектива, а с другой стороны (сверху), оправой окуляра. Стандартизация этого размера в микроскопах, сделанных в СССР, в 160 мм позволяет широко применять взаимную замену объективов и окуляров одних другими, учитывая также взаимозаменяемость резьб оправ объективов и диаметров окуляров, обычно вкладываемых в тубус микроскопа.

В конструкции микроскопа можно выделить оптическую и механическую части.

Оптическая схема микроскопа (см. рисунок 105) делится на две системы: осветительную, включающую в себя зеркало 1, либо упрощенный осветитель 2, либо осветитель 3, обеспечивающий принцип нормального освещения, и конденсор 4 с ирисовой апертурной диафрагмой 5, откидной линзой 6 и съемным светофильтром, и наблюдательную, состоящую из объектива 7, призмы 8, окуляра 9 — монокулярной насадки или линзы 10, призмы 11, призмного блока 12 и окуляров 13 — бинокулярной насадки.

Пучок лучей от источника света падает на зеркало 1, которое отражает его к апертурной диафрагме 5, проходит через конденсор 4, исследуемый препарат и попадает в объектив 7.

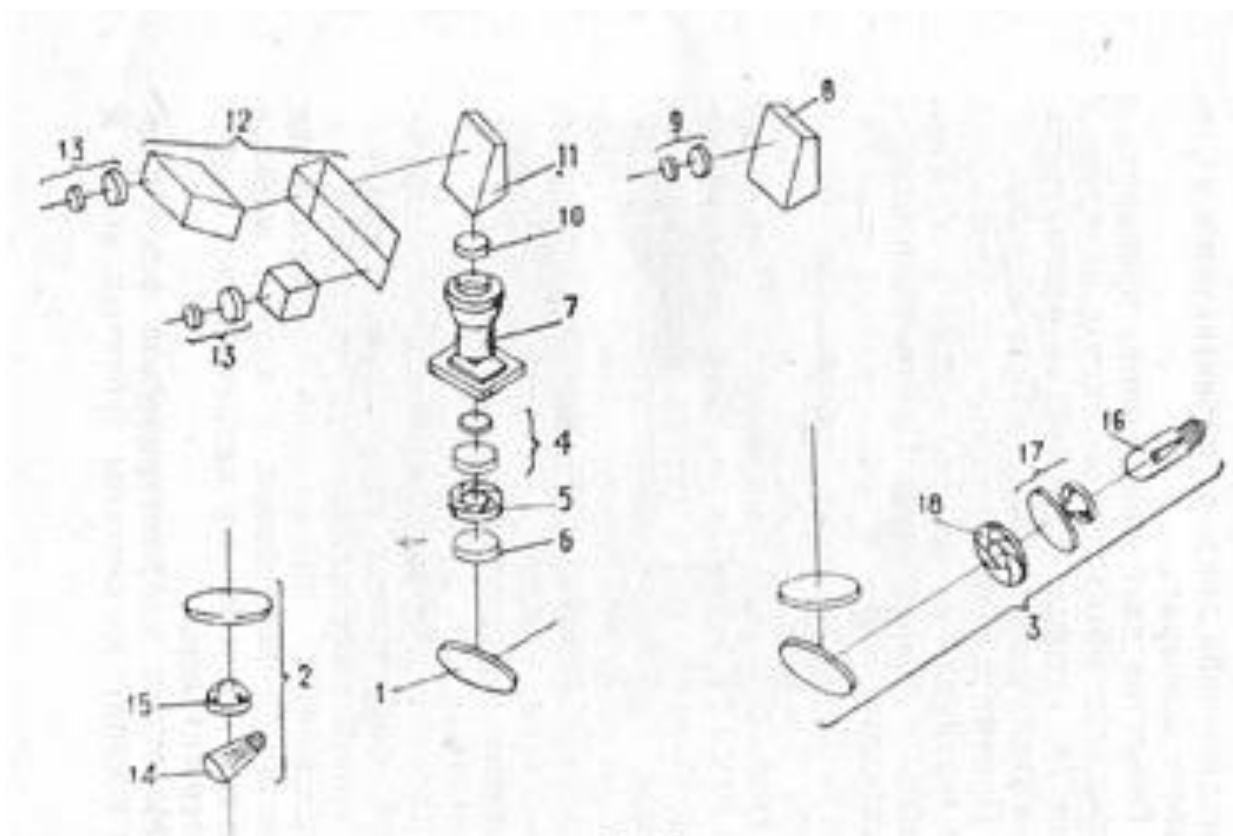


Рисунок 105 - Оптическая система микроскопа

При использовании упрощенного осветителя 2 пучок лучей от источника света 14 проходит через линзы 15 и 6, конденсор 4, исследуемый препарат и попадает в объектив 7. При работе с осветителем 3 лучи от источника света 16 коллектором 17 проектируются в плоскость апертурной ирисовой диафрагмы 5 конденсора 4, а полевая диафрагма 18 с помощью конденсора 4 (при выключенной линзе 6) проектируется в плоскость препарата.

Объектив дает изображение препарата в плоскости полевой диафрагмы окуляров 9 или 13, которые служат для рассматривания увеличенного изображения объекта.

Призма 8 (или 11) отклоняет пучок лучей от вертикали на 45° , что весьма удобно при работе с микроскопом. Призмный блок 12 разделяет пучок и обеспечивает возможность бинокулярного наблюдения препарата.

Основание 19 (см. рисунок 106) микроскопа прямоугольной формы имеет снизу три опорные площадки, что обеспечивает устойчивое положение микроскопа на поверхности рабочего стола. Коробка 20 с механизмом микрометрической фокусировки крепится к основанию. С одной стороны коробки укреплена направляющая, по которой перемещается кронштейн конденсора, с другой имеется паз для перемещения направляющей с тубусодержателем.

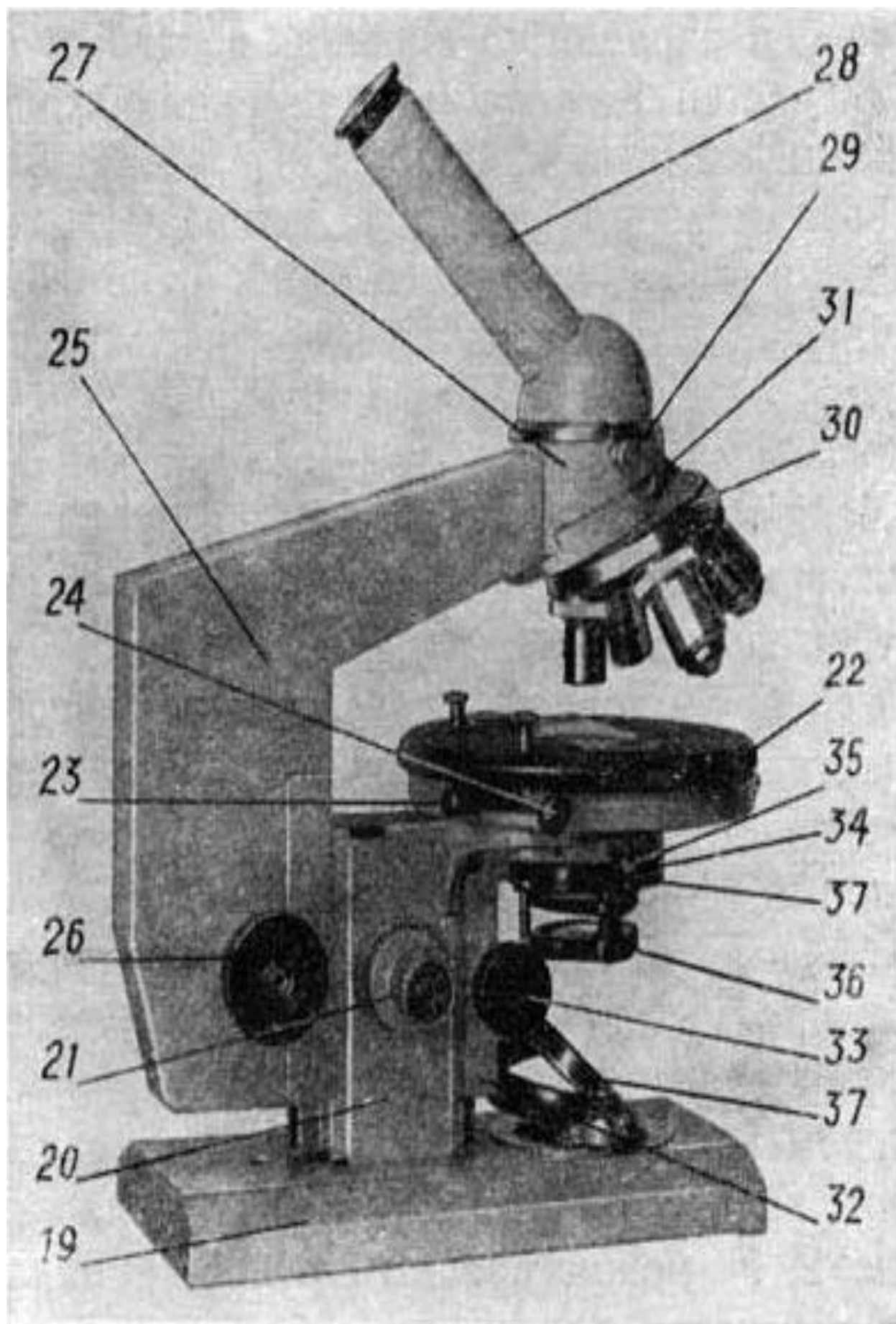


Рисунок 106 - Основные узлы микроскопа

Механизм микрометрической фокусировки состоит из системы зубчатых колес и рычага; он приводится в действие вращением рукояток 21, расположенных справа и слева на коробке. Справа на оси рукояток укреплен барабан со шкалой, разделенной на 50 частей. Каждое пятое деление обозначено цифрами от «0» до «9». По шкале барабана можно определить величину подъема или опускания тубуса. Один оборот барабана соответствует перемещению тубуса на 0,1 мм. Общая величина перемещения тубуса от упора до упора — 2,2—2,4 мм.

Механизм микрометрической фокусировки перемещает тубус вместе с механизмом грубой фокусировки. При вращении рукояток грубой и тонкой фокусировок по часовой стрелке тубус микроскопа опускается, при вращении против часовой стрелки — поднимается.

Сменные предметные столики (см. рисунок 107) крепятся на кронштейне, который в свою очередь укреплен на коробке механизма микрометрической фокусировки. Верхний диск круглого предметного столика 22 (см. рисунок 106, 107) можно вращать рукой за накатанную часть, для чего необходимо отпустить винт 23. Кроме того, при помощи двух винтов 24 (справа и слева) и пружины в передней части столика его можно перемещать для центрировки, что позволяет привести в поле зрения нужный участок препарата.

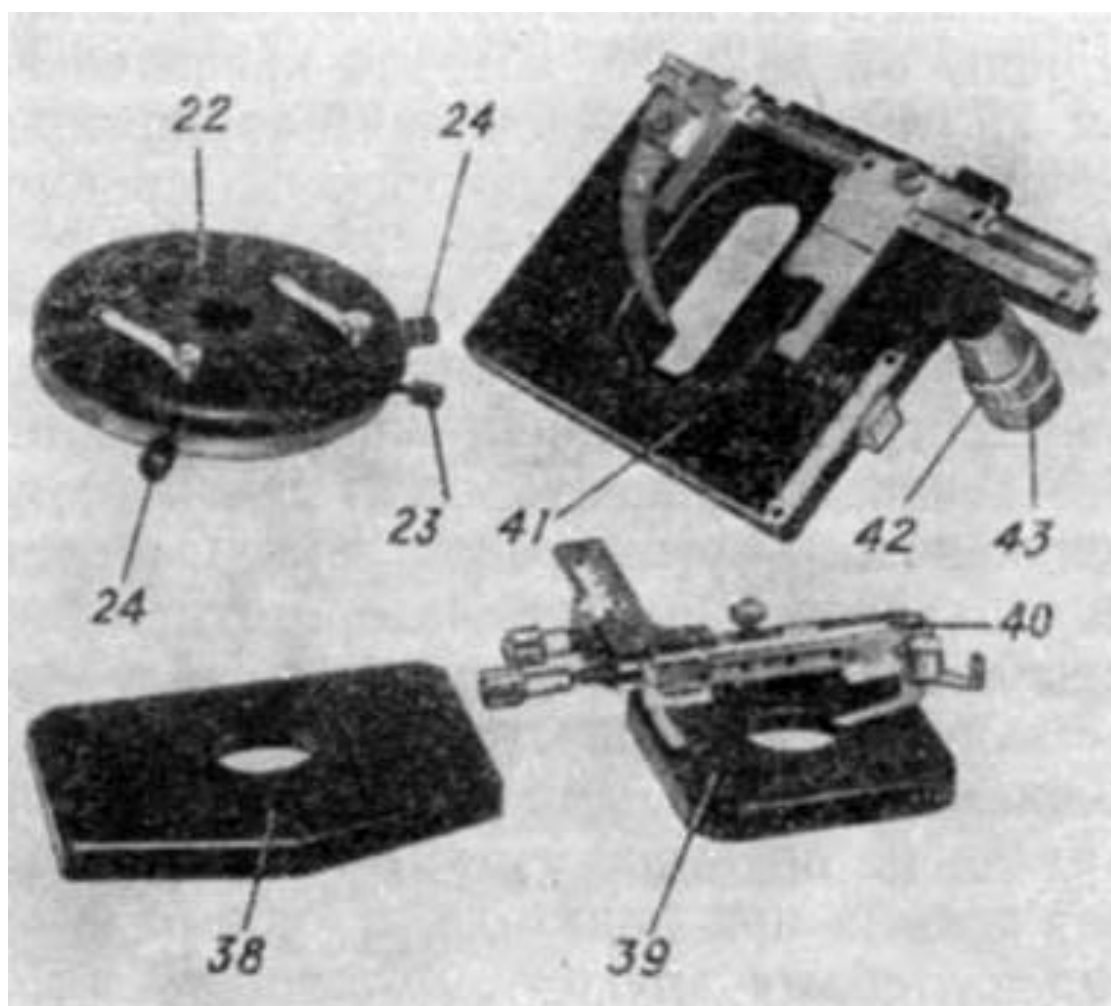


Рисунок 107 - Предметные столики микроскопа

Тубусодержатель 25 (см. рисунок 105), имеющий современную прямоугольную форму, в нижней части несет направляющую и трибку с двумя рукоятками 26 для грубой фокусировки микроскопа. Поворотом рукояток навстречу друг другу можно регулировать ход механизма грубой фокусировки от легкого до тугого.

В верхней части тубусодержателя укреплена головка 27 с направляющей типа «ласточкин хвост» для револьвера и гнездом для наклонной монокулярной (или бинокулярной) насадки 28, которая крепится винтом 29. Форма тубусодержателя позволяет помещать на столик микроскопа предметы больших размеров.

На револьвере 30 имеется четыре отверстия с резьбой для ввинчивания объективов. Центрированное положение объективов обеспечивается фиксатором (защелкой), расположенным внутри револьвера. Отверстия для объективов на револьвере отцентрированы относительно оси тубуса с такой точностью, что смещение точки препарата, установленной в центре поля зрения окуляра 7х, не превышает двух третей радиуса поля зрения при переходе от одного объектива к любому другому, входящему в комплект данного микроскопа (кроме объектива 3,5х, который является поисковым).

В верхней части револьвера имеется направляющая типа «ласточкин хвост» для установки его на головку тубусодержателя. Правильное положение револьвера относительно оси тубуса фиксируется винтом 31, закрепленным контргайкой. Кронштейн 32 конденсора укреплен на направляющей коробки 20, перемещение кронштейна производится рукояткой 33. Кронштейн имеет цилиндрическую гильзу для конденсора в корпусе 34, который крепится в гильзе винтом 35, расположенным на кольце кронштейна сбоку. На оси трибки кронштейна с левой стороны посажена гайка с двумя отверстиями, поворотом которой (с помощью ключа) можно предотвратить самопроизвольное опускание кронштейна и в то же время обеспечить его достаточно легкий ход. Эта регулировка особенно важна при применении конденсора с фазовоконтрастным устройством КФ-4 или КФ 5.

Двухлинзовый конденсор микроскопа снабжен ирисовой диафрагмой, которая открывается и закрывается с помощью рукоятки, и дополнительной откидной линзой в оправе 36. При работе с объективами малого увеличения, например, 3,5; 8 или 9х, в ход лучей включается откидная линза. Подъем кронштейна с конденсором ограничен упором, и в его крайнем верхнем положении между плоскостью предметного столика и фронтальной линзой конденсора остается зазор 0,03—0,2 мм.

Если нанести иммерсионное масло между фронтальной линзой конденсора и предметным стеклом, апертура конденсора будет равна 1,2, без иммерсионного масла — 1,0.

Откидная рамка в нижней части оправы конденсора служит для установки светофильтра дневного света или матового стекла. Под конденсором устанавливается зеркало в оправе 37, которое имеет две отражающие поверхности: плоскую и вогнутую. Вогнутая поверхность используется при работе без конденсора с объективами малых увеличений.

Предметные столики 38 (см. рисунок 107) и 39 жестко крепятся на кронштейне. На поверхности столиков имеется семь отверстий: четыре крайних отверстия служат для установки пружинных клемм, прижимающих препарат, три средних - для крепления накладного препаратоводителя 40.

Предметный столик 41 имеет механизм координатного перемещения препарата. Рукояткой 42 можно перемещать верхнюю часть столика вместе с однокоординатным препаратоводителем в направлении, параллельном плоскости симметрии штатива микроскопа. С помощью рукоятки 43 можно перемещать препаратоводитель вместе с препаратом в продольном направлении. Величины перемещения препарата в обоих направлениях отсчитываются по шкалам и нониусам.

В основание микроскопа может быть установлен осветитель 44 (см. рисунок 108).

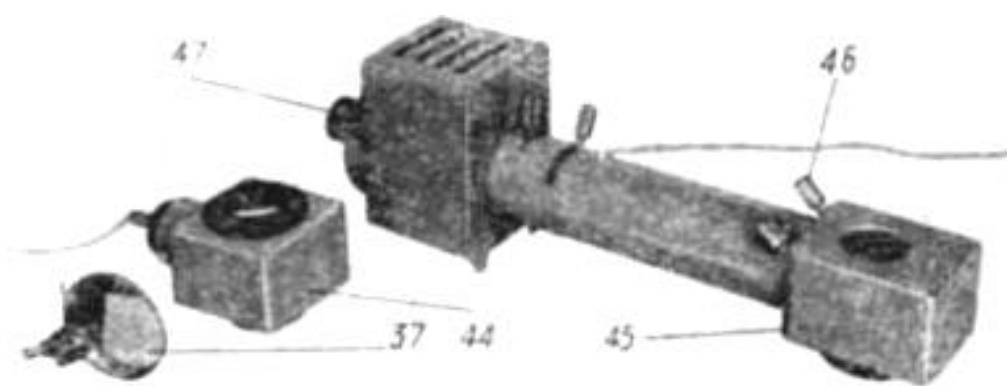


Рисунок 108 - Осветитель

В качестве окуляров микроскопа наиболее часто применяют окуляры типа Гюйгенса (см. рисунок 102). В отдельных случаях применяют так называемые компенсационные окуляры типа Кельнера, которые частично компенсируют хроматизм увеличения объектива.

Микроскопы обычно снабжаются сменными объективами и окулярами. Например, биологический микроскоп имеет объективы $8^{\times}$, $40^{\times}$ и $90^{\times}$ и окуляры $7^{\times}$, $10^{\times}$ и $15^{\times}$. Такой микроскоп позволяет получать различные увеличения от $56^{\times}$ до $1350^{\times}$.

К оптической системе микроскопа относятся не только собственно микроскопы, биологические, отсчетные, поляризационные и т. п. К таким системам относятся вообще все визуальные оптические приборы, предназначенные для рассмотрения близко расположенных предметов — компараторы, стереометры и т. п.

Перейдём теперь к рассмотрению телескопических систем.

Оптические системы, предназначенные для наблюдения сильно удаленных предметов, называются *телескопическими*. Их отличительным оптическим свойством является то, что в систему лучи поступают в виде параллельных пучков и выходят из системы также в виде параллельных пучков. Эти системы применяются для визуального наблюдения предметов. Предметы наблюдаются в виде изображений, образованных оптической системой, под

значительно большими углами, чем при рассмотрении их невооруженным глазом. Вследствие этого происходит искажение перспективы. Все предметы представляются приближенными к наблюдателю, а пространство предметов сжатым по направлению наблюдения.

Простейшая телескопическая система состоит из двух элементов: объектива и окуляра. Чтобы удовлетворить условию параллельности сопряженных пучков лучей в пространстве предметов и в пространстве изображений, необходимо, чтобы задний фокус объектива совпадал с передним фокусом окуляра. Оптическая длина такой системы равна сумме *фокусных* расстояний объектива и окуляра.

По своей оптической схеме большинство телескопов делятся на:

- линзовые (рефракторы) — в качестве объектива используется линза или система линз (см. рисунок 109)

- зеркальные (рефлекторы) — в качестве объектива используется вогнутое зеркало (см. рисунок 110)

- зеркально-линзовые телескопы (катадиоптрические) — в качестве объектива используется сферическое зеркало, а линза, система линз или мениск служит для компенсации аберраций

Кроме того, для наблюдений Солнца профессиональные астрономы используют специальные солнечные телескопы, отличающихся конструктивно от традиционных звездных телескопов.



Рисунок 109 - Старинный телескоп-рефрактор

Если в качестве окуляра применена положительная оптическая система (например, симметричный окуляр), то такая оптическая система, дающая обратное изображение, называется системой Кеплера. К таким системам относятся зрительные трубы геодезических и астрономических инструментов. Ход лучей в такой системе показан на рисунке 111. Объектив является входным зрачком. Он образует изображение величиной $2l'$ в передней фокальной плоскости окуляра. Выходной зрачок системы расположен за окуляром. Глаз наблюдателя, помещенный в выходном зрачке, сможет рассмотреть все изображение, так как через выходной зрачок проходят все пучки лучей.



Рисунок 110 - Современный телескоп-рефлектор

Если в качестве окуляра применена отрицательная оптическая система, то такая система называется системой Галилея. Она имеет применение в театральных биноклях. Ход лучей в тонкой системе Галилея показан на рисунке 112.

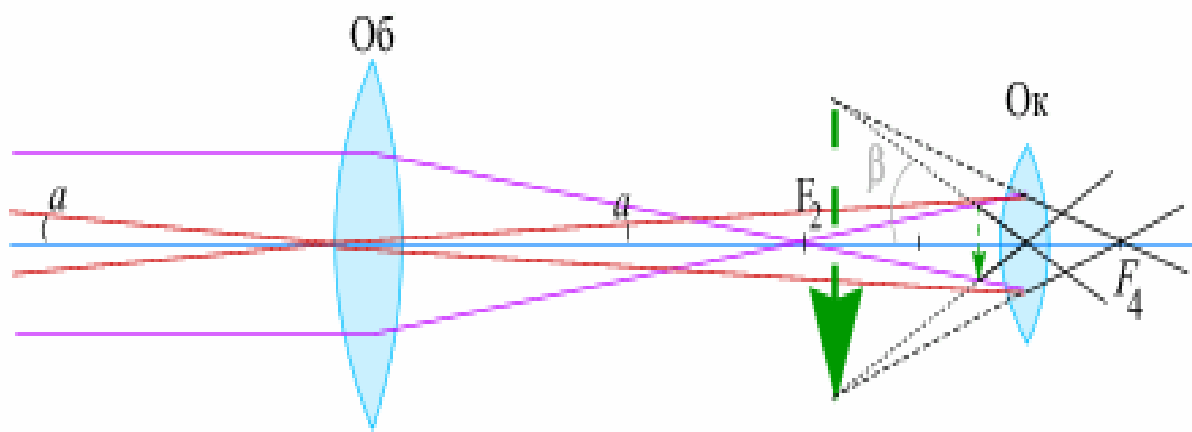


Рисунок 111 - Оптическая система Кеплера

Ее преимуществом является сокращение длины, что наглядно показано. При одинаковых фокусных расстояниях объектива и окуляра система Галилея короче системы Кеплера на два фокусных расстояния окуляра.

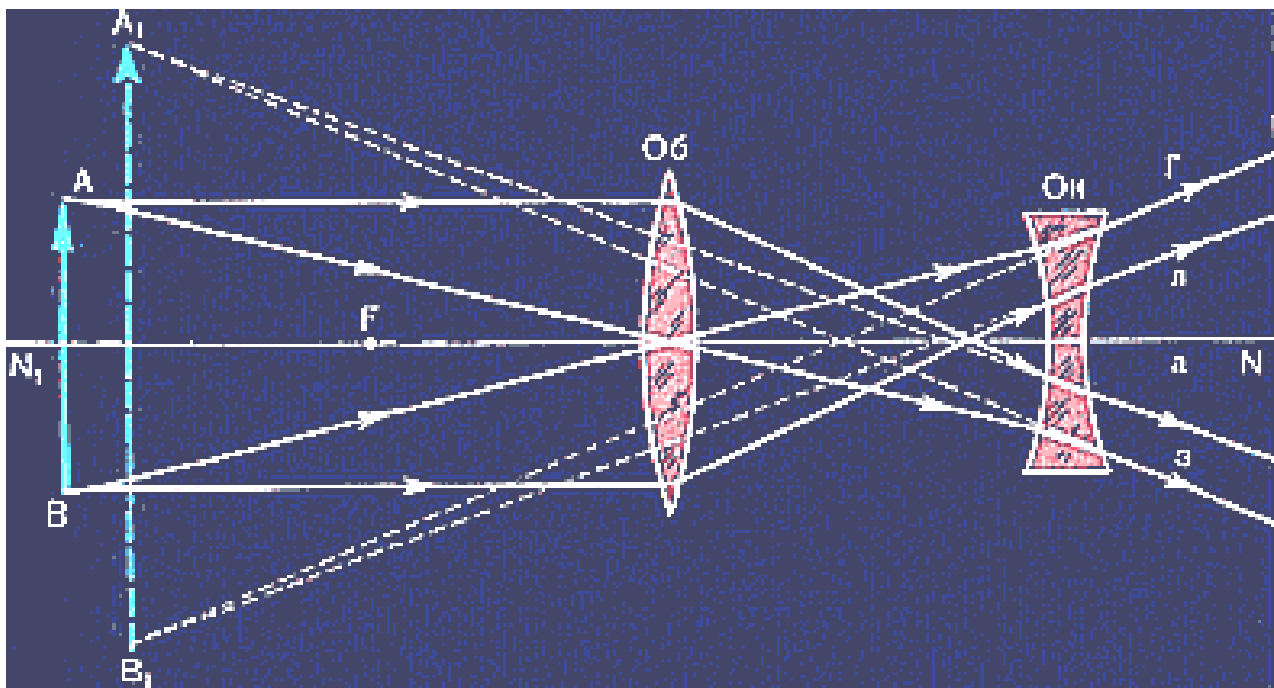


Рисунок 112 - Оптическая система Галилея

Главными оптическими характеристиками телескопической системы являются:

- видимое увеличение Γ
- поле зрения $2w$
- диаметр выходного зрачка D'

Видимое увеличение есть отношение тангенсов:

$$\frac{\operatorname{tg} w'}{\operatorname{tg} w} = \frac{f'_{об}}{f_{ок}} = -\Gamma \quad (291)$$

Знак минус указывает на то, что изображение обратное. Обычно знак минус в формуле видимого увеличения опускается.

Видимым увеличением телескопической системы называется также отношение диаметра входного зрачка к диаметру выходного зрачка:

$$\Gamma = \frac{D}{D'} \quad (292)$$

Диаметр входного зрачка выбирается из условия разрешающей способности $\psi = \frac{140}{D}$, а диаметр выходного зрачка — из условия видимого увеличения $\Gamma = \frac{D}{D'}$. Поле зрения телескопической системы ограничивается полем зрения окуляра. Принимая за наибольшее угловое поле зрения окуляра $2w'=100^\circ$, получим возможный угол поля зрения системы

$$\operatorname{tg} w_{\max} = \frac{\operatorname{tg} 50}{\Gamma} \quad (293)$$

Однако следует иметь в виду, что в некоторых случаях, поступаясь качеством изображения, применяют окуляры и с полем зрения до $2w'=140^\circ$.

При рассмотрении необходимой разрешающей способности зрительных труб надо учитывать разрешающую способность глаза. За разрешающую способность глаза обычно принимают $60''$, хотя исследования указывают на значительно большие возможности глаза. Исходя из формулы (287), запишем необходимую разрешающую способность зрительной трубы (в секундах)

$$\psi = \frac{60}{\Gamma} \quad (294)$$

Можно получить зависимость между диаметром входного зрачка и видимым увеличением зрительной трубы, т. е. формулу полезного увеличения зрительной трубы

$$\Gamma_{\Pi} = 0,5 D \quad (295)$$

Полезным увеличением называется то наименьшее увеличение зрительной трубы, при котором разрешающая сила объектива может быть полностью использована глазом наблюдателя.

Оценку разрешающей способности телескопических систем всегда производят в угловой мере.

Длина простой зрительной трубы равна

$$L = f_{\text{ок}} + f_{\text{об}} \quad (296)$$

Если оптическая система должна быть длинной (цистоскоп, перископ, смотровые трубки и т. п.), то между объективом и окуляром помещают

оборачивающие системы. Они предназначены для поворота изображения на 180° вокруг оптической оси и удлинения хода лучей в приборе. Применяются линзовые оборачивающиеся системы двух типов, однообъективные и двухобъективные (см. рисунок 113). В двухобъективной системе между объективами лучи идут в виде параллельных пучков. Длина однообъективной системы равна

$$L_{oc} = -a + a' \quad (297)$$

Длина двухобъективной системы равна

$$L_{oc} = -f_1 + d + f_2' \quad (298)$$

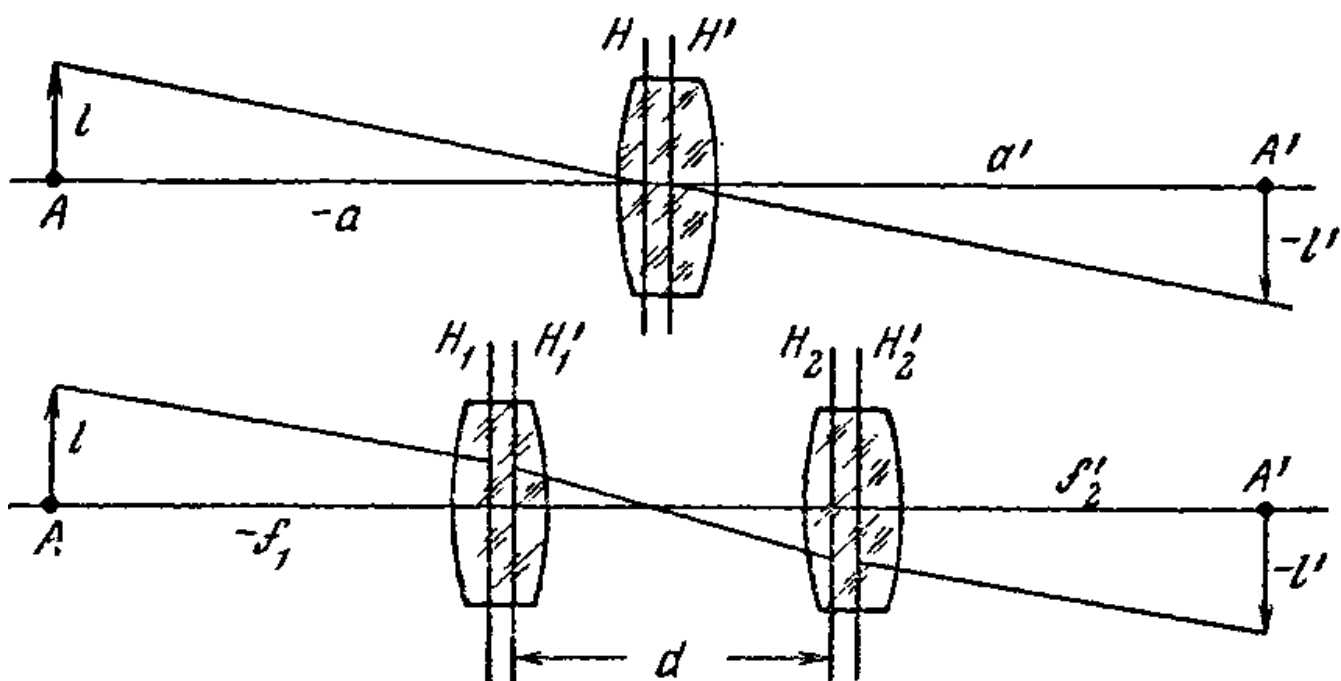


Рисунок 113 - Оборачивающая система

Таким образом, общая длина телескопической системы, включающей оборачивающие системы, определяется уравнением

$$L = f_{об} + \sum L_{oc} + f_{ок} \quad (299)$$

Габариты телескопической системы определяются длиной и диаметром. Длина системы зависит от фокусных расстояний объектива, окуляра, объективов оборачивающих систем и расстояния между объективами оборачивающих систем. Диаметр системы зависит от относительных отверстий, углов поля зрения, коэффициента виньетирования и положения зрачков.

Расчету габарита предшествует составление технических условий на систему. Кроме основных характеристик в технические условия включаются

требования к виду изображения (прямое или обратное), длине системы, наличию качающихся или вращающихся деталей и т. п.

Расчет габарита разделяется на две части:

- определение фокусных расстояний компонентов и расстояний между ними
- расчет диаметров деталей и узлов

Первоначально определяются фокусные расстояния всех компонентов, составляющих систему, и расстояния между ними. При расчете габарита толщины всех линзовых деталей и узлов принимаются равными нулю, тогда все линзы, объективы и окуляр изображаются в виде главных плоскостей, а отражающие призмы и пластины редуцируются к воздуху.

Оптическая система, заданная основными характеристиками (Γ , $2w$, D , L), может быть осуществлена при различных фокусных расстояниях компонентов.

Телескопические приборы охватывают большую группу оптических приборов. В различных отраслях техники эти приборы получили свое самостоятельное развитие, обусловленное условиями эксплуатации и точностями определения тех или иных параметров.

Основными группами приборов являются: 1) астрономические, 2) геодезические, 3) зрительные трубы, 4) бинокли, 5) перископы, 6) прицелы винтовочные, 7) прицелы пулеметно-минометные, 8) прицелы танковые, 9) прицелы артиллерийские, 10) прицелы авиационные, 11) дальномеры.

Некоторые из оптических приборов настолько хорошо конструктивно отработаны, что сохраняют оптическое устройство и конструкцию на протяжении многих десятилетий. К таким оптическим приборам относится стереотруба, предназначенная для стереоскопического рассмотрения из-за укрытий. Подобные бинокулярные оптические приборы состоят из двух однотипных половинок для левого и правого глаза. Зрительные трубы являются составной частью многих приборов в пирометрии, фотограмметрии, гравиметрии, спектроскопии, фотометрии, гониометрии, микроскопии и т. д.

2.4.5 Дифракция света

При прохождении пучка света вблизи края какого-либо непрозрачного экрана путь пучка не остается строго прямолинейным. Например, в опыте Юнга свет глубоко проникает в область геометрической тени и именно в этой области наблюдается интерференционная картина. Проходя через маленькое отверстие, пучок света приобретает большую угловую расходимость — тем большую, чем меньше размер отверстия. В центре геометрической тени, создаваемой круглым непрозрачным диском, существует маленькое светлое пятно ("пятно Пуассона"). Лазерный луч, падающий на дифракционную решетку, образует широкий расходящийся "веер" лучей. При выполнении некоторых условий наблюдаются полосы у края геометрической тени экрана и часть света проникает в область тени. Такие явления впервые были отмечены Гримальди и Гуком. В 1802 г. Юнг считал, что эти полосы образуются вследствие интерференции световой волны, идущей от края экрана, с прямым пучком.

Френель показал, что независимо от того, имеет ли препятствие острый или закругленный край, полосы получаются примерно одинаковыми. Френель рассчитал положение полос, исходя из взаимной интерференции вторичных волн, постулированных Гюйгенсом, приняв во внимание, что часть волнового фронта обрезается экраном. При этом он получил результаты, хорошо согласующиеся с опытом. Кирхгоф подтвердил расчеты Френеля, исходя из анализа, основанного на волновом уравнении. В некоторых случаях удобнее пользоваться методом Юнга, хотя метод Френеля обладает значительно большей общностью.

Дифракцией называют все отклонения от прямолинейного распространения света. Арнольд Зоммерфельд определил дифракцию как "любое отклонение распространения света от прямолинейного, не связанное с отражением или преломлением". В более узком смысле дифракцией называют явление огибания волной препятствия. Используя понятие интерференции света, можно сказать, что дифракция — это интерференция в ограниченных световых пучках. Наиболее отчетливые дифракционные эффекты возникают при распространении света близ непрозрачных препятствий, хотя дифракция происходит и на прозрачных объектах.

Все перечисленные факты можно объяснить, если допустить, что свет это волна. Прямолинейность распространения света не противоречит его волновой природе, так как длина световой волны очень мала — менее 10^{-6} м. Сильных волновых эффектов можно ожидать в случае, если поперечный размер светового пучка становится соизмеримым с длиной волны. Это хорошо подтверждается многими экспериментами, в частности опытом по дифракции лазерного пучка на дифракционной решетке. Принципиальное значение дифракции состоит в том, что она, как и интерференция, доказывает волновую природу света. Дифракция имеет большое практическое значение, поскольку она ограничивает возможности концентрации света в пространстве, кладет предел разрешающей способности оптических приборов, влияет на формирование оптического изображения и т. п.

Первое сообщение о наблюдении дифракции света было сделано Гримальди; оно было опубликовано в 1665 г. вскоре после его смерти. Гримальди проводил свои опыты на установке, схема которой показана на рисунке 96. Источник света освещает отверстие в непрозрачном экране, а в плоскости, расположенной на некотором расстоянии позади экрана, измеряется освещенность. Гримальди установил, что переход от света к тени происходит постепенно, а не резко (см. рисунок 114). Этот результат не мог найти удовлетворительного объяснения в рамках корпускулярной теории света, согласно которой свет должен распространяться прямолинейно, а изображение отверстия в плоскости наблюдения должно иметь резкую границу.

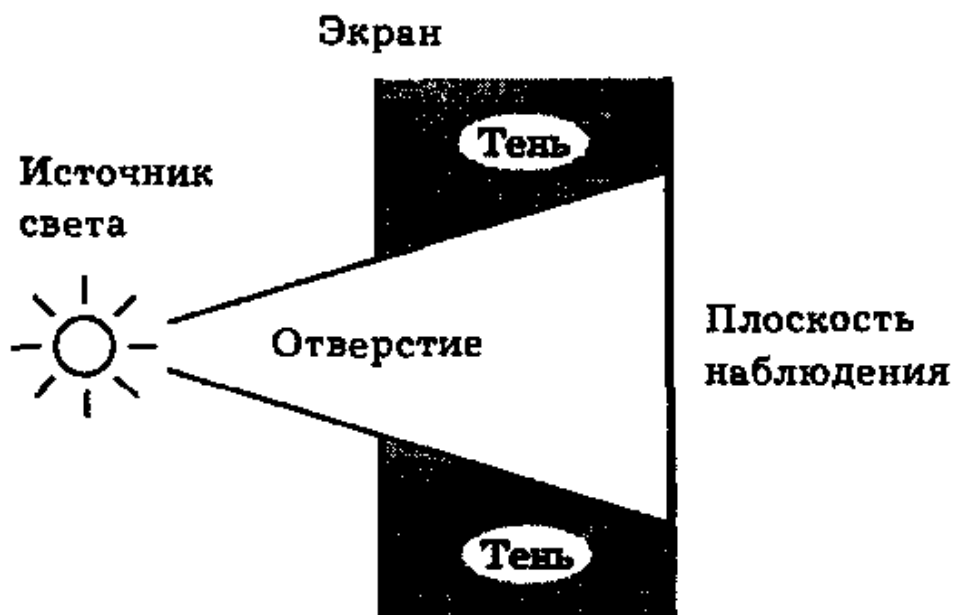


Рисунок 114 - Схема опыта Гримальди по наблюдению дифракции света

Еще более удивительный результат получается, если повторить опыт Гримальди, используя в качестве источника света лазер. В данном случае, как и в опыте Гримальди, нет резкой границы между светом и тенью (см. рисунок 115, 116). Более того, вблизи границы геометрической тени наблюдается чередование темных и светлых линий, параллельных краю экрана. Такой характер наблюдаемой картины указывает на интерференционную природу явления дифракции.



Рисунок 115- Освещенность в плоскости наблюдения вблизи границы области геометрической тени (некогерентное освещение)

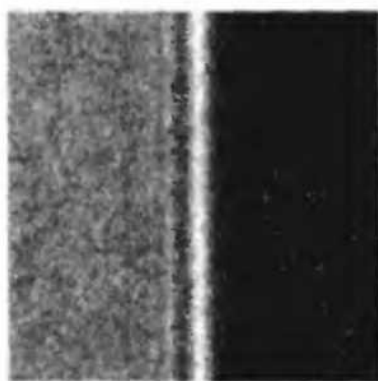


Рисунок 116 - Освещенность в плоскости наблюдения вблизи границы области геометрической тени (когерентное освещение)

Понимание природы дифракционных явлений связано с развитием представлений о свете как о волне. Первый шаг на этом пути сделал в конце XVII в. голландский ученый Христиан Гюйгенс. В 1678 основываясь на догадке о том, что свет это волна, он выдвинул идею, раскрывающую механизм распространения света. Гюйгенс полагал, что свет распространяется от источника подобно волне на поверхности воды. На фронте светового возмущения каждая точка есть источник вторичной сферической волны. Положение волнового фронта в следующий момент времени определяется огибающей вторичных волн (т.н. принцип Гюйгенса). Это который принцип дал удовлетворительное объяснение законам преломления и отражения света. Он позволял построить последовательность волновых поверхностей по одной заданной волновой поверхности. Но, пользуясь принципом Гюйгенса, нельзя вычислить распределение освещенности в дифракционной картине. Принцип Гюйгенса иллюстрирует рисунок 117, на котором показаны волновой фронт светового возмущения, элементарные вторичные волны, огибающая вторичных волн.

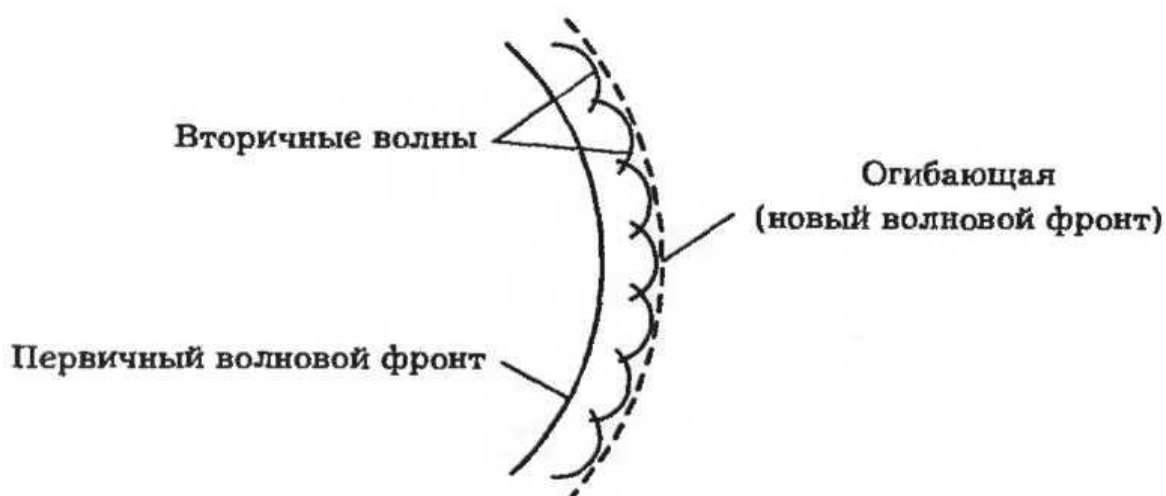


Рисунок 117 - Положение огибающей световой волны по Гюйгенсу

Огюстен Френель и его последователи дополнили теорию Гюйгенса, задавая более детально свойства вторичных элементарных волн. Френель дополнил принцип Гюйгенса представлением о том, что вторичные световые волны могут как усиливать, так и ослаблять друг друга. Иначе говоря, они могут интерферировать. Световое поле есть результат интерференции элементарных вторичных волн, испускаемых каждым элементом некоторой волновой поверхности — это утверждение составляет содержание принципа Гюйгенса-Френеля. Основываясь на этом принципе, Френель смог с большой точностью рассчитать распределение света в дифракционных картинах. В конце XIX в. (1882) немецкий ученый Густав Кирхгоф показал, что нет необходимости пользоваться специальными предположениями относительно свойств элементарных волн. Полный расчет распространения волны можно выполнить непосредственно путем решения волнового уравнения. И принцип Гюйгенса можно считать приближенной формой теоремы, называемой интегральной теоремой Кирхгофа.

Таким образом, вопрос о распространении света прошел три стадии.

Гюйгенс высказал скорее интуитивное, чем логическое утверждение, что, зная возмущение, производимое волной во всех точках произвольно расположенной поверхности S в момент времени t_0 , можно определить возмущение в точке Q в более поздний момент времени t (см. рисунок 118).

Френель сделал специальные предположения относительно амплитуды вторичной волны, приходящей в точку Q от элемента площади dS . Он смог рассчитать распределение освещенности в дифракционной картине. Его результаты совпадали с экспериментальными данными.

Кирхгоф показал, что возмущение, приходящее от элемента площади, можно найти из волнового уравнения без каких-либо специальных предположений. Он показал также, что предположения, сделанные Френелем, справедливы лишь в тех случаях, когда ни источник, ни точка Q не находятся очень близко к поверхности S .

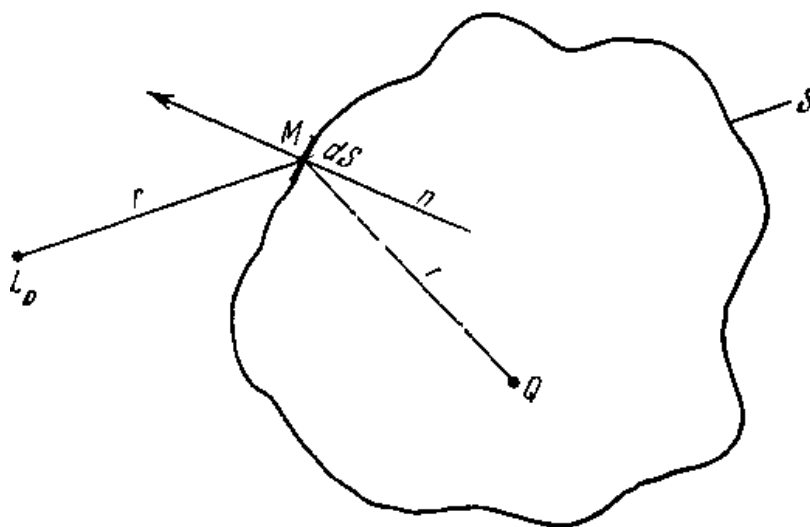


Рисунок 118 - Пояснение принципа Гюйгенса

В зависимости от условий, при которых наблюдаются дифракционные явления, принято рассматривать дифракцию Френеля и дифракцию Фраунгофера. Если расстояние от дифракционного экрана до точки наблюдения невелико (фронт волны является сферическим), то такую дифракцию называют дифракцией Френеля. Если же расстояние от дифракционного экрана до точки наблюдения очень велико по сравнению с его размерами (так, что в точке наблюдения вторичные волны можно считать плоскими), то наблюдается дифракция Фраунгофера.

На рисунке 119 изображено устройство, в котором параллельный пучок света проходит через щель в экране S_1 (так называемый дифракционный экран) и попадает на второй экран S_2 . Если экраны находятся очень близко друг к другу, то освещенность экрана S_2 постоянна в пределах геометрического изображения щели в экране S_1 и равна нулю во всех остальных точках S_2 . В этом случае, в пределах точности наблюдений, свет распространяется прямолинейно. Если экран S_2 отделяют от экрана S_1 то появляется область, где геометрическое изображение щели еще легко узнать, хотя на его краях и возникают светлые и темные полосы. Это и есть дифракция Френеля (см. рисунок 119).

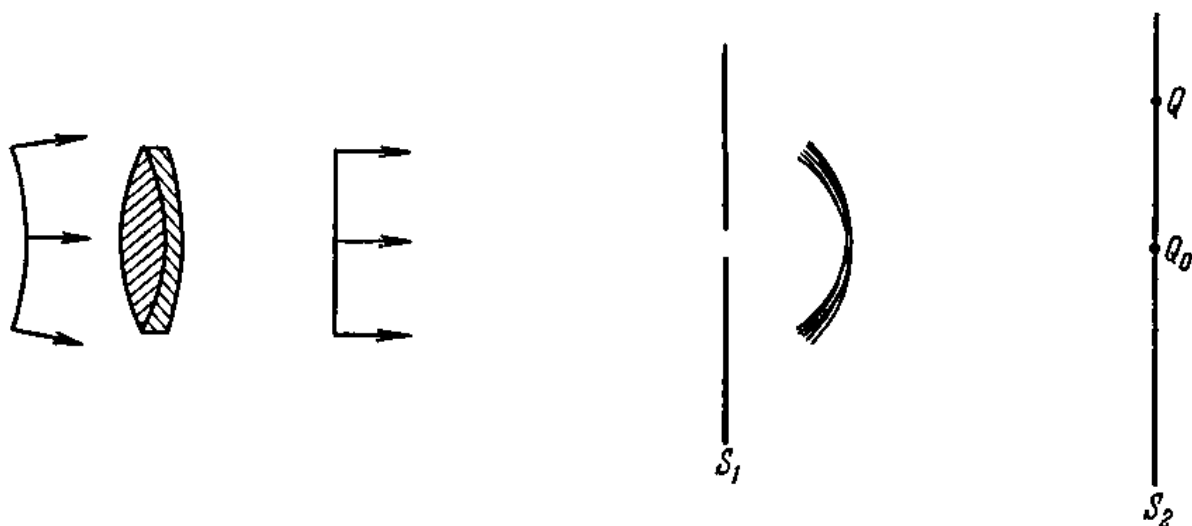


Рисунок 119 - Дифракция параллельного пучка света на щели

Рассмотрим теперь установку, схема которой изображена на рисунке 120. Щель L_p , освещаемую источником света, помещают в фокусе линзы L_1 а экран S_2 — в фокусе линзы L_2 . В отсутствие дифракции света на отверстии в экране S_1 изображение щели L_p находилось бы на экране S_2 . Если дифракционный эффект мал, то на S_2 наблюдается изображение L_p окруженное полосами. Распределение света на S_2 определяется формой и размером отверстий в S_1 (а также формой и размером L_p), но не воспроизводит их по форме. Дифракция такого типа есть дифракция Фраунгофера.

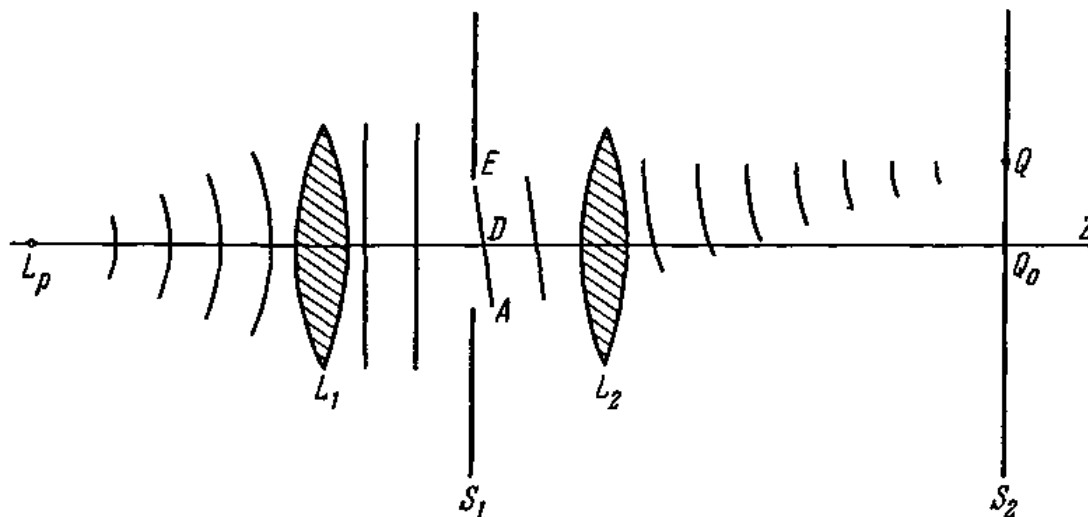


Рисунок 120 - Схема системы, в которой наблюдается дифракция Фраунгофера

Таким образом, для классификации дифракционных явлений также следует различать три области образования изображения препятствия или источника света:

- резкое изображение препятствия, соответствующее фактически прямолинейному распространению света и отсутствию дифракции
- дифракционное изображение препятствия — дифракция Френеля
- дифракционное изображение источника света — дифракция Фраунгофера

Дифракция Френеля была детально изучена раньше, чем дифракция Фраунгофера. Дифракционные явления важны для понимания волновой теории и имеют ряд интересных применений. Дифракция Фраунгофера имеет большую практическую ценность для общей теории оптических приборов и теории дифракционных решеток.

Основная задача теории дифракции состоит в отыскании структуры светового поля при наличии препятствий распространению волны. Однако, даже в простых случаях – это трудная задача. Поэтому при рассмотрении дифракции Френеля и Фраунгофера используют простые методы, основанные на принципе Гюйгенса. Эти методы дают приближенные решения многих практических вопросов и являются введением к более общей теории, связанной с понятием групп волн. Такое общее рассмотрение существенно для волновой и квантовой теорий.

Зоны Френеля.

Френель предложил приближенный способ расчета дифракционных картин, основанный на представлении о так называемых полуволновых зонах или зонах Френеля.

Зоны Френеля вводятся следующим образом. Выберем поверхность Σ в виде сферы с центром в точке S . Согласно принципу Гюйгенса-Френеля, данную поверхность можно рассматривать как источник вторичных световых волн. Выделим на сфере кольцевые зоны так, чтобы расстояния от границ зоны

до точки наблюдения отличались на половину длины световой волны. Обозначив границы зон буквами $M_0, M_1, M_2, \dots$, получим

$$\begin{aligned} M_0P &= OP + \frac{3\lambda}{2} \\ M_1P &= M_0P + \frac{\lambda}{2} \\ &\dots\dots\dots \\ M_nP &= M_{n-1}P + \frac{\lambda}{2} \end{aligned} \quad (300)$$

где λ — длина световой волны, P — точка наблюдения поля, O — центр нулевой зоны Френеля (см. рисунок 121).

Итак, формулы (300) определяют положение границ зон Френеля. Смысл разбиения поверхности Σ на зоны состоит в том, что разность фаз элементарных вторичных волн, приходящих в точку наблюдения от данной зоны, не превышает величины π . Сложение таких волн приводит к их взаимному усилению. Поэтому каждую зону Френеля можно рассматривать как источник вторичных волн, имеющих определенную фазу. Напротив, две соседние зоны Френеля действуют как источники, колеблющиеся в противофазе. Подчеркнем, что положение границ френелевских зон зависит от выбора точки наблюдения.

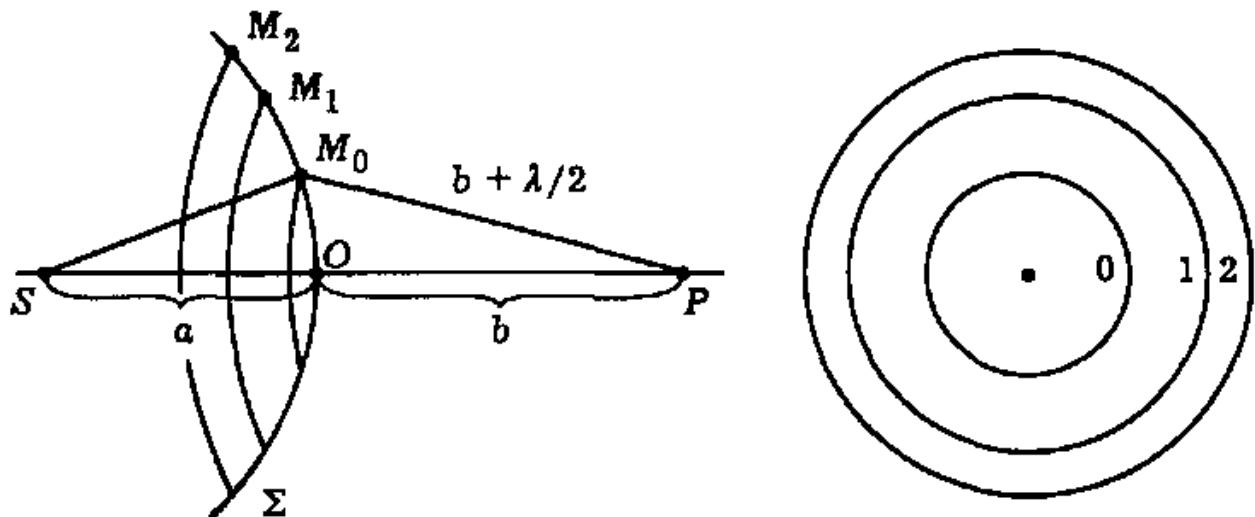


Рисунок 121 - К расчёту френелевских зон

Оценим радиусы зон Френеля и их площади. На рисунке 104 показаны точечный источник света S , точка наблюдения поля P , часть сферической поверхности Σ (источника вторичных волн) и граница нулевой зоны Френеля M_0 . Пусть a — радиус сферы Σ , b — кратчайшее расстояние от точки P до сферы, r_0 — радиус нулевой зоны Френеля. Из рисунка 104 видно, что

$$r_0^2 = a^2 - (a - x)^2 \quad (301)$$

где x — длина отрезка, выделенного жирной линией. С другой стороны,

$$r_0^2 = \left(b + \frac{\lambda}{2}\right)^2 - (b + x)^2 \quad (302)$$

Из (301), (302) следует, что

$$2ax = b\lambda - 2bx + \left(\frac{\lambda}{2}\right)^2 \quad (303)$$

Как правило, в оптике нас интересует случай

$$a, b \gg \lambda, x \quad (304)$$

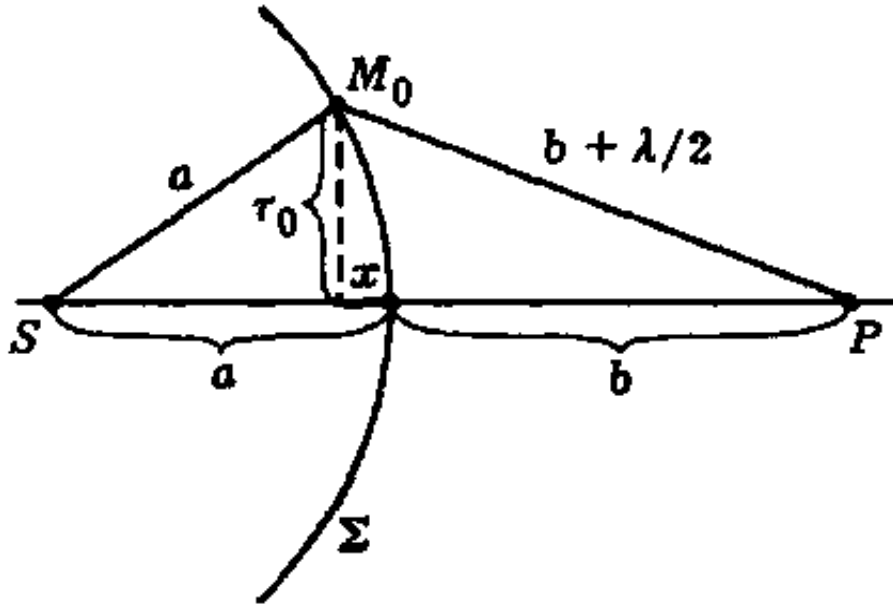


Рисунок 122 - К расчёту френелевских зон

Поэтому, пренебрегая слагаемыми, пропорциональными λ^2 и x^2 , получим

$$x = \frac{b\lambda}{2(a+b)} \quad (305)$$

и $r_0^2 \approx 2ax$, откуда

$$r_0 = \sqrt{\frac{\lambda ab}{a+b}} \quad (306)$$

Итак, формула (306) дает радиус нулевой зоны Френеля. В этой формуле λ — длина световой волны, a и b — длины отрезков показанных на рисунке 122. Аналогичным образом находим внешний радиус n -й зоны Френеля

$$r_n = \sqrt{(n+1) \frac{\lambda ab}{a+b}} \quad (307)$$

Физическое содержание задачи почти не изменится, а формулы станут проще, если вместо дифракции сферической волны точечного источника рассмотреть дифракцию плоской световой волны.

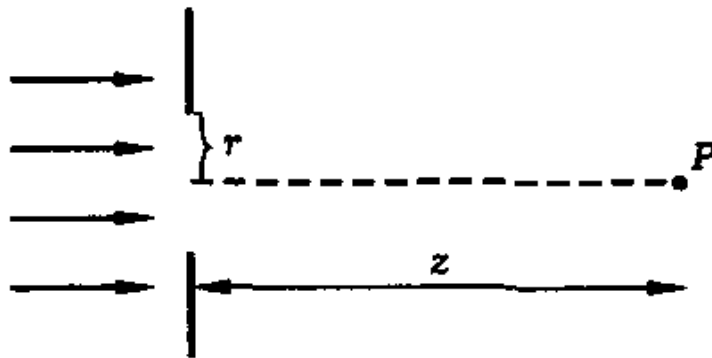


Рисунок 123 - Схема дифракции плоской волны на круглом отверстии

Пусть, например, плоская монохроматическая световая волна дифрагирует на круглом отверстии (см. рисунок 123). Выберем некоторую точку P на оси пучка и попытаемся выяснить, как будет меняться интенсивность света в данной точке при изменении радиуса отверстия.

Обозначим через z расстояние от точки наблюдения до экрана с отверстием, а через r — радиус отверстия. В качестве поверхности Σ — источника вторичных волн — введем круг радиуса r , лежащий в плоскости экрана и совпадающий с отверстием. Пользуясь определением, данным выше, произведем разбиение поверхности Σ на зоны Френеля. В данном случае зоны Френеля представляют собой кольца на плоскости. Их радиусы можно подсчитать по формуле (307), полагая $a \rightarrow \infty$, $b = z$. Получим

$$r_n = \sqrt{(n+1)\lambda z} \quad (308)$$

Из (308) следует, что зоны Френеля имеют одинаковые площади, определяемые формулой

$$S_n = \pi(r_n^2 - r_{n-1}^2) = \pi\lambda z \quad (309)$$

Число Френеля. Если известны параметры λ — длина световой волны, r — радиус отверстия, z — расстояние от экрана с отверстием до точки

наблюдения поля, то, используя (308), можно вычислить число N_F зон Френеля, попадающих в пределы отверстия, или число открытых френелевских зон. Это число называется числом Френеля, оно играет важную роль в теории дифракции. Полагая

$$r_n = r, \quad n + 1 = N_F \quad (310)$$

получим из (308), (310)

$$N_F = \frac{r^2}{\lambda z} \quad (311)$$

2.4.6 Интерференция света

Многочисленные эксперименты и фотометрические измерения показывают, что при взаимодействии света двух различных источников (например, дневного света и света настольной лампы) результирующая освещенность в любой точке равна сумме освещенностей, создаваемых каждым источником в отдельности. Этот эмпирический закон, который называется законом фотометрического сложения, применим также к излучению различных участков протяженного источника света. При рассмотрении геометрической модели распространения света было показано, что в некотором приближении изменение интенсивности в пучке света можно описать как функцию площади поперечного сечения трубки лучей. При суперпозиции двух или большего числа световых пучков распределение интенсивности в общем случае уже нельзя описывать таким простым способом. Так, если свет от одного источника разделить подходящим прибором на два пучка, а затем наложить их друг на друга, то интенсивность в области суперпозиции пучков будет меняться от точки к точке, достигая максимума, превышающего сумму интенсивностей пучков, и минимума, который может оказаться равным нулю. Это явление называется интерференцией. Таким образом, под интерференцией света понимают обычно широкий круг явлений, в которых при наложении пучков света результирующая интенсивность не равна сумме интенсивностей отдельных пучков: в одних местах она больше, в других – меньше, т.е. возникают чередующиеся светлые и темные участки – интерференционные полосы. При суперпозиции пучков строго монохроматического света интерференция возникает всегда. Однако от реальных физических источников свет никогда не бывает строго монохроматическим.

В более общем смысле интерференционные полосы есть стационарное пространственно-периодическое изменение результирующей амплитуды нескольких волн (и, следовательно, освещенности) в световом поле. Это изменение суммарной интенсивности происходит вследствие изменения разности хода между интерферирующими пучками света. Последнее приводит к различию в разности фаз, в результате чего волны усиливают друг друга в

одних точках и ослабляют в других. Распределение освещенности в световом поле можно вычислить, применив принцип суперпозиции.

Два пучка света называют когерентными, если разность фаз между волнами, образующими эти пучки, остается постоянной за время наблюдения. Два пучка называют некогерентными, если разность фаз между образующими эти пучки волнами многократно и нерегулярным образом изменяется в течение самого короткого промежутка времени наблюдения. Термины «когерентный» и «некогерентный» описывают идеализированные состояния, которые никогда строго не осуществляются в практических условиях. Идеально монохроматические волны точно одинаковой частоты, т.е. бесконечно длинные цуги волн, всегда полностью когерентны. Никакие другие волны не являются когерентными в самом строгом смысле этого слова.

В результате интерференции на удалённом экране наблюдается интерференционная картина, состоящая из чередования тёмных и светлых областей – интерференционных полос.

Общие условия наблюдения интерференционных полос заключаются в следующем:

I. Свет, достигающий данной точки пространства, должен представлять собой совокупность цугов волн, пришедших разными путями, но от одного и того же атома.

II. Разность длин этих путей должна быть достаточно малой, чтобы эти цуги волн были хотя бы частично когерентными.

III. Интерференционные полосы, создаваемые светом различных участков источника, должны быть локализованы в одном и том же (или приблизительно в одном и том же) месте.

Последнее условие автоматически выполняется, если два источника являются изображением одного очень малого источника. Условия II и III не очень жестки. Очевидно, что максимальная видимость получается, если разность хода очень мала, так что интерферирующие пучки строго когерентны, и если полосы, образованные светом разных участков одного и того же источника, точно совпадают. При не строгом соблюдении этих условий видимость полос сильно зависит от условий их наблюдения. При визуальном наблюдении большую роль играет яркость поля зрения. Полосы обычно не наблюдаются, если максимумы, образуемые светом от концов протяженного источника, отстоят от максимумов, образованных светом центральных его участков, больше чем на $1/4$ ширины полосы.

Можно рассмотреть три вида интерференционных полос, получающихся при следующих условиях:

$\lambda = \text{const}$, $\theta = \text{const}$. При вариации геометрической разности хода будут иметь место полосы равной толщины.

$\lambda = \text{const}$, $\Delta = \text{const}$. При вариации угла θ получаем полосы равного наклона.

$\lambda = \text{const}$, $\theta = \text{const}$. При вариации волнового числа получаем полосы равного хроматического порядка (интерференционные линии в спектре).

Интерференционные полосы различного типа в одних случаях характеризуются некоторыми общими соотношениями, в других — имеют характерные, только им присущие свойства.

Существуют два общих метода получения интерферирующих пучков из одного светового пучка, и они лежат в основе классификации устройств, применяемых в интерферометрии. В одном из них пучок делится, проходя сквозь близко расположенные друг к другу отверстия. Такой метод - метод деления волнового фронта - пригоден только при достаточно малых источниках. В другом способе пучок делится на одной или нескольких частично отражающих, частично пропускающих поверхностях. Этот метод - метод деления амплитуды - может применяться с протяженными источниками и обеспечивает большую интенсивность, чем первый метод. В любом случае удобно рассматривать отдельно явления, возникающие при суперпозиции двух пучков (двухлучевая интерференция), и явления, возникающие при суперпозиции большего их числа (многолучевая интерференция).

Рассмотрим случай интерференции волн от двух одинаковых синфазных монохроматических точечных источников S_1 и S_2 (см. рисунок 75), находящихся на расстоянии d друг от друга. Если расстояние l до экрана, где наблюдаются интерференционные полосы, много больше расстояния между источниками ($l \gg d$), то амплитуды обеих волн в точке наблюдения практически одинаковы и для напряженности поля в точке P можно написать

$$\begin{aligned} E &= E_0 \cos(kr_1 - \omega t) + E_0 \cos(kr_2 - \omega t) = \\ &= 2E_0 \cos \frac{k(r_2 - r_1)}{2} \cos \left[\frac{k(r_2 + r_1)}{2} - \omega t \right], \end{aligned} \quad (312)$$

где r_1 и r_2 — расстояния от источников до точки наблюдения P (см. рисунок 124). Величину $\Delta = r_2 - r_1$, называют разностью хода интерферирующих волн. Интенсивность результирующего колебания пропорциональна квадрату амплитуды, поэтому

$$I = 4I_0 \cos^2 \left(\frac{k\Delta}{2} \right) = 2I_0 (1 + \cos k\Delta) \quad (313)$$

где I_0 — интенсивность колебаний от одного источника. Освещенность экрана в минимумах равна нулю, а в максимумах — учетверенному значению освещенности, создаваемой одним источником. Положение максимумов определяется условием $k\Delta = \pm \pi m$, где целое число $m=0, 1, 2, \dots$ называется порядком интерференции. Учитывая, что $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ условие максимумов можно записать в виде $\Delta = m\lambda$ — разность хода равна целому числу длин волн.

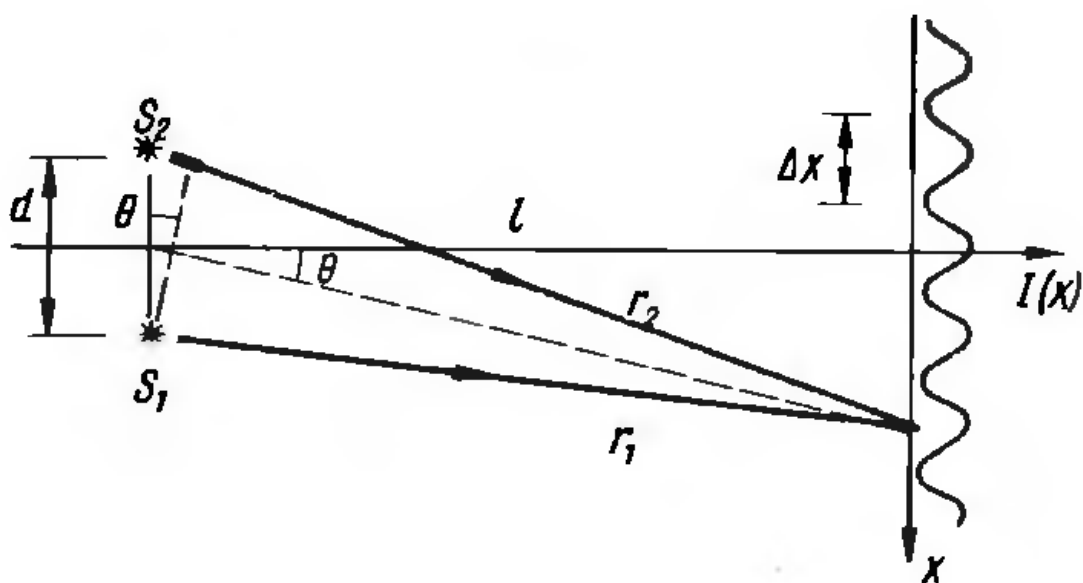


Рисунок 124 - К интерференции волн, испускаемых точечными источниками

В том случае, когда волны от источников распространяются не в вакууме, а в среде с показателем преломления n , формула (313) остается в силе, но в ней под Δ следует понимать не геометрическую, а оптическую разность хода интерферирующих волн:

$$\Delta = n(r_2 - r_1) \quad (314)$$

Чтобы найти зависимость освещенности экрана от координаты x (см. рисунок 124), нужно разность хода Δ выразить через координату x точки наблюдения P . Для удобства введем угол θ , образуемый направлением на точку P с перпендикуляром к линии, соединяющей источники (т.е. с «оптической осью» рассматриваемой схемы). В практически важном случае малых значений θ ($\theta \ll 1$) для разности хода можно написать $\Delta = d\theta$. Так как $\theta \approx \frac{x}{l}$. Подставляя Δ в (313), получаем

$$I(x) = 2I_0 \left[1 + \cos \frac{kdx}{l} \right] \quad (315)$$

При $x=0$ расположен максимум, соответствующий нулевой разности хода. Для него порядок интерференции $m=0$. Это центр интерференционной картины. Расстояние между соседними максимумами или минимумами (пространственный период интерференционной картины) Δx : определяется из условия $\frac{k d \Delta x}{l} = 2\pi$, откуда $\Delta x = \frac{2\pi l}{kd} = \frac{\lambda l}{d}$. Если ввести угол схождения лучей α — $\alpha \approx \frac{d}{l}$, т.е. угол, под которым видны источники из точки наблюдения, то выражение для Δx можно записать следующим образом:

$$\Delta x \approx \frac{\lambda}{\alpha} = \frac{\lambda l}{d} \quad (316)$$

Это совпадает со случаем интерференции плоских волн, распространяющихся под углом α . В самом деле, на большом расстоянии от источников сферические волны на небольших участках приближенно можно рассматривать как плоские, угол между направлениями которых при $\theta \ll 1$ приближенно равен d/l .

Кольца Ньютона

Интерференционную картину полос равной толщины можно наблюдать от воздушной прослойки, образованной плоскопараллельной пластинкой и соприкасающейся с ней плосковыпуклой (см. рисунок 125) или двояковыпуклой линзой. В этом случае геометрическим местом точек одинаковой толщины является окружность и поэтому соответствующие полосы равной толщины будут иметь вид концентрических окружностей с центром в точке соприкосновения линзы с плоскопараллельной пластинкой. В отраженном свете в центре интерференционной картины будет наблюдаться минимум. Это обусловлено тем, что в месте соприкосновения линзы с пластинкой в точке А образуется крайне тонкий воздушный зазор (толщина его намного меньше длины волны), приводящий к потере полуволны.

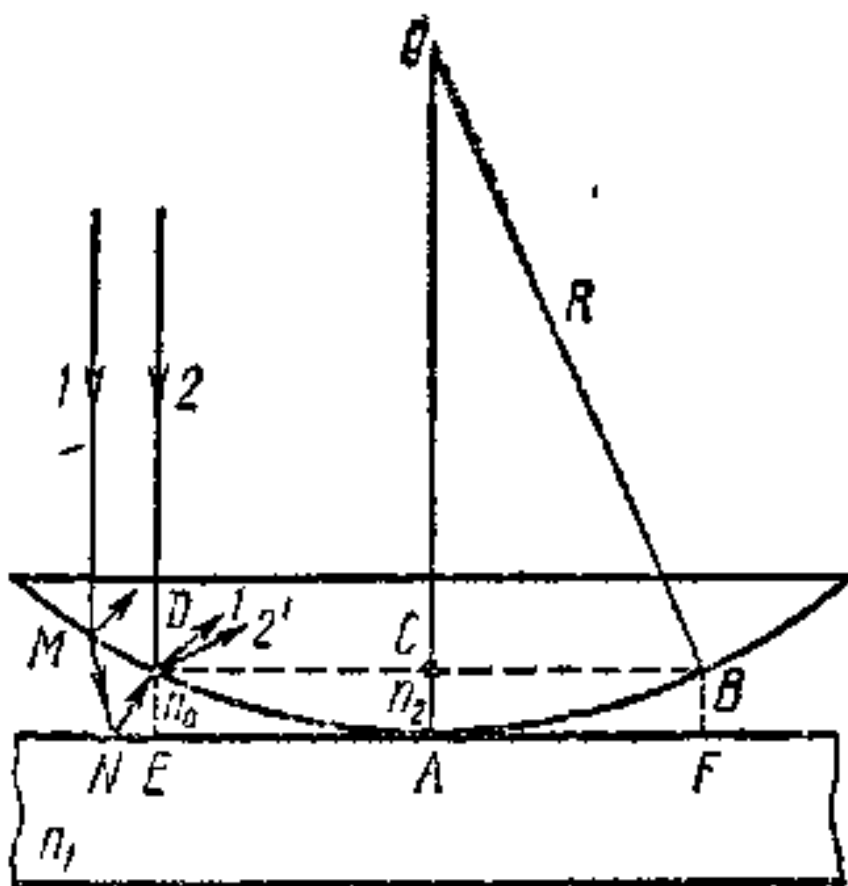


Рисунок 125 - Установка для наблюдения колец Ньютона

Подобные полосы впервые наблюдались Гуком. Однако вследствие того, что они были подробно исследованы Ньютоном, их называют кольцами Ньютона. Схема, с помощью которой наблюдаются кольца Ньютона, представлена на рисунке 125. Роль пластинки переменной толщины играет воздушная прослойка между линзой и плоскопараллельной пластинкой. Границы этой «пластинки» определяются снизу верхней поверхностью плоскопараллельной пластинки, сверху — нижней поверхностью линзы. Параллельный пучок света, выделенный из точечного источника, расположенного в фокусе линзы (линза и источник на рисунке не изображены), направляется на систему линза — плоскопараллельная пластинка. Некоторый луч 1 этого пучка после отражения от нижней поверхности воздушной прослойки выходит из точки D. В эту же точку падает другой луч 2, который частично отражается. Лучи 1' и 2' являются когерентными и при наложении интерферируют между собой. Так как подобная интерференционная картина наблюдается с помощью отраженных лучей, то ее называют интерференционной картиной в отраженном свете. Аналогичную картину можно наблюдать в прошедшем свете.

Вычислим разность хода для интерферирующих лучей. Высоту в точке D (см. рисунок 125), откуда выходят лучи 1' и 2', обозначим через h, т. е. DE=h. Пусть коэффициенты преломления пластинки, линзы и прослойки между ними соответственно будут n_1 , n_2 и n_0 . Разность хода для лучей 1' и 2' будет

$$\Delta d = 2hn_0 \cos r \pm \frac{\lambda}{2} \quad (317)$$

Знак перед $\frac{\lambda}{2}$ определяется взаимными соотношениями n_1 , n_2 и n_0 , т. е. зависит от того, где (в точке **N** или в точке **D**) происходит потеря полуволны. В частности, если линза и пластинка изготовлены из стекла, а прослойка между ними воздушная, т. е. $n_1=n_2>n_0$, то $\frac{\lambda}{2}$ входит в уравнение со знаком плюс (так как потеря полуволны происходит на нижней границе воздушной прослойки). При нормальном падении луча $\cos r \cong 1$. Считая $n_0 = 1$, получим

$$\Delta d = 2h \pm \frac{\lambda}{2} \quad (318)$$

Вычислим радиусов для максимумов и минимумов. Пусть высота DE=h соответствует максимуму m-го порядка, т. е.

$$2h_m \pm \frac{\lambda}{2} = m\lambda \quad (319)$$

где $m = 1, 2, 3, \dots$ и DE=BF= h_m . Тогда радиус для максимума m-го порядка будет AE=AF= r_m . Исходя из формулы (154) и треугольника OCB, можно определить r_m :

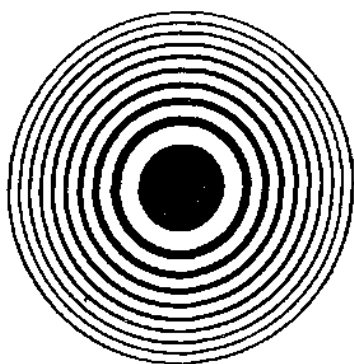
$$(OB)^2 = (OC)^2 + (BC)^2, R^2 = (R - h_m)^2 + \rho_m^2$$

где R — радиус кривизны линзы. Считая, что $h_m < R$, имеем

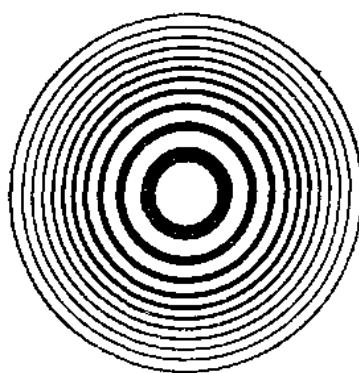
$$\rho_m^2 = 2Rh_m \quad (320)$$

Подставляя выражение h_m из (319) в (320), получим

$$\rho_m = \sqrt{R\lambda \left(m - \frac{1}{2}\right)} \quad (321)$$

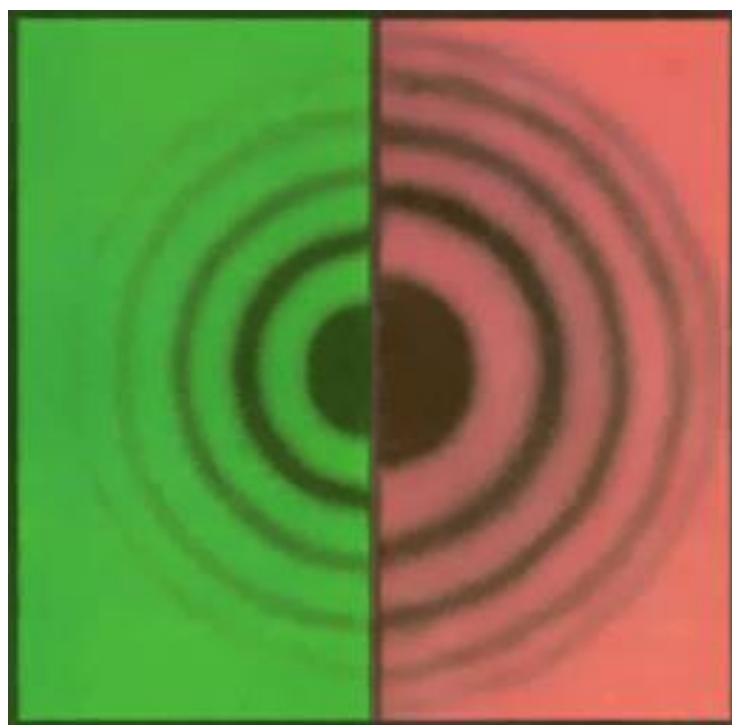


а



б

Схематично



В монохроматическом свете

Рисунок 126 - Кольца Ньютона

Минимумы наблюдаются, если $2h + \frac{\lambda}{2} = (2m + 1)\frac{\lambda}{2}$. Следовательно, радиусы для минимумов определяются как

$$\rho'_m = \sqrt{R\lambda m} \quad (322)$$

При наблюдении интерференции в прошедшем свете потери полудлины волны не происходит и разность хода между интерферирующими лучами будет равна

$$\Delta d = 2h \quad (323)$$

Аналогичные вышеприведенные расчеты показывают, что и в этом случае радиусы для минимумов и максимумов определяются соответственно формулами (321) и (322). Следовательно, интерференционные картины в отраженном и прошедшем свете взаимно дополняют друг друга (см. рисунок 126).

При наблюдении в монохроматическом свете возникает чередование темных и светлых колец (полос). В белом же свете вследствие зависимости радиуса кольца от длины волны возникают цветные полосы, так называемые цвета Ньютона. Каждая полоса начинается от центра фиолетовым и заканчивается красным цветом.

Кольца Ньютона хорошо видны через лупу или микроскоп с малым увеличением, если радиус кривизны линзы порядка 1 м или больше.

Можно показать, что, в то время как радиус кольца пропорционален квадратному корню из соответствующего порядка или номера кольца, расстояние между соседними кольцами уменьшается с увеличением r . Как следует из (322),

$$\begin{aligned} \rho_m^2 + \rho_{m-1}^2 &= R\lambda \\ (\rho_m + \rho_{m-1})(\rho_m - \rho_{m-1}) &= R\lambda \end{aligned} \quad (324)$$

Отсюда

$$\Delta\rho_m = \rho_m - \rho_{m-1} \cong \frac{R\lambda}{2\rho_m} = \frac{\sqrt{R\lambda}}{2\sqrt{\rho_m}} \quad (325)$$

Из этих формул вытекает, что при наблюдении в белом свете на некотором расстоянии от центра произойдет наложение различных порядков интерференции. Поэтому по мере удаления от центра экран становится все более равномерно освещенным.

Для наблюдения максимумов высоких порядков нужно пользоваться светофильтрами. При этом не имеет существенного значения, где располагается фильтр — между источником света и установкой Ньютона или же между глазом и областью наблюдения. В первом случае фильтр пропускает нужную длину волны из числа многих, во втором из всевозможного числа картин позволяет наблюдать только ту интерференционную картину, которая соответствует данной длине волны. Результат в обоих случаях будет одинаковым.

Не представляет большого труда доказать, что при удалении линзы от пластинки, т. е. при увеличении толщины воздушной прослойки, кольца Ньютона сжимаются и каждый раз при увеличении расстояния на полуволну одно из них пропадает.

Установка Ньютона позволяет простым способом определить приблизительное значение длины волны света. Для этого, как следует из формулы (321), достаточно определить радиус для максимума данного порядка при известном радиусе кривизны линзы.

Опыт Юнга

Одним из первых пытался наблюдать интерференцию света Гримальди в опытах, в которых свет от источника S_e проходил через две щели a_1 и a_2 в экране B (см. рисунок 127, а). Он наблюдал полосы на экране C . Позже Юнг показал, что интерференционные полосы могут появляться, только если источник S_e достаточно мал. Юнг использовал дополнительный экран A с одной щелью a_0 , чтобы сократить эффективный размер источника, и получил интерференционные полосы на экране C (см. рисунок 127, б). Опыт Юнга считается первым истинным наблюдением интерференционных полос. Установить сейчас точно, какие именно полосы наблюдал Гримальди, уже трудно; возможно, что они объясняются явлением дифракции на щелях, так как весьма похожие полосы можно получить и с одной щелью. В современных вариантах опытов Юнга или Гримальди для наблюдения полос обычно применяют окуляр со средним увеличением.

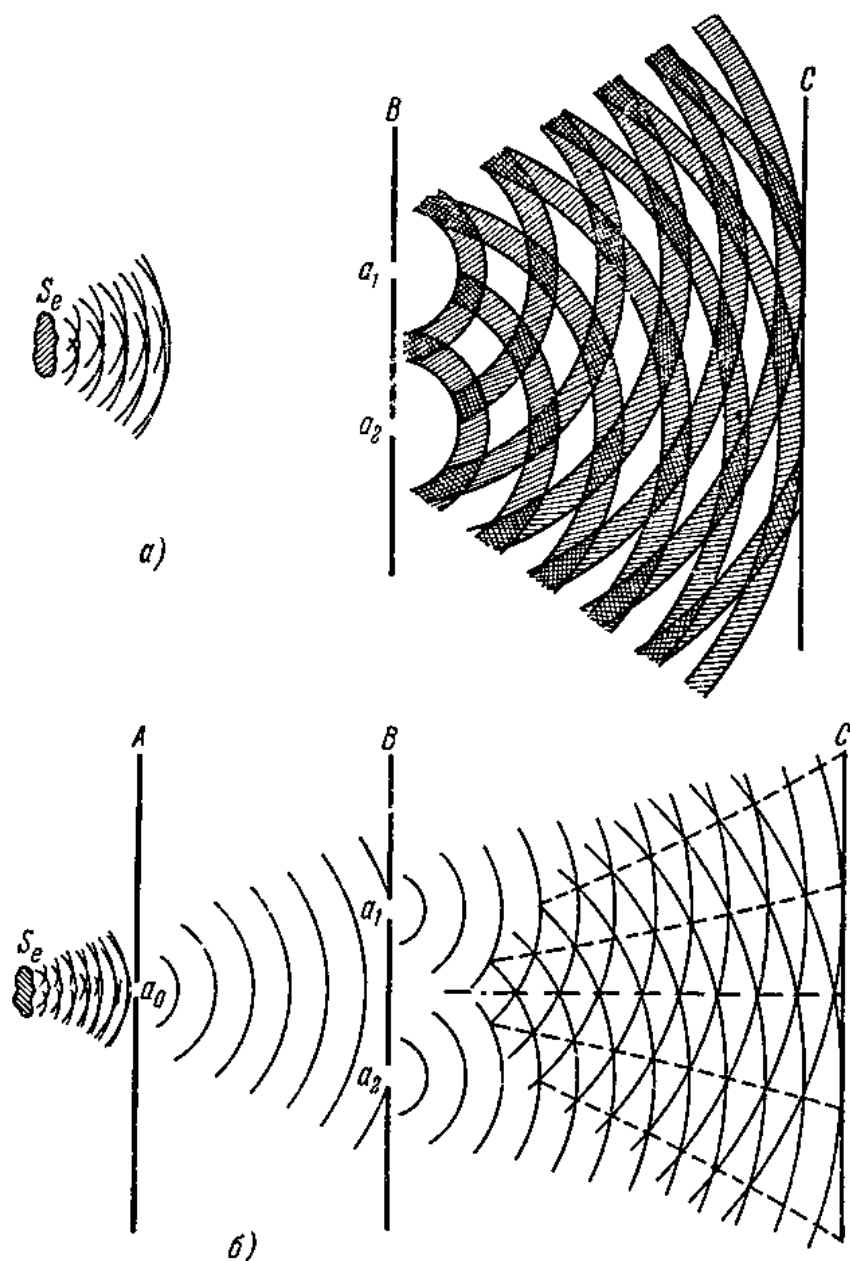


Рисунок 127 - Схемы опытов Гримальди (а) и Юнга (б)

В опыте Юнга полосы образуются при интерференции почти сферических волн, идущих от a_1 и a_2 . В опыте Гримальди волновые фронты размазаны, так как на экран В падает беспорядочный набор волн от источника S_e . Практически размазывание ещё сильнее, чем это показано на рисунке, и полосы размыты.

Трудности наблюдения интерференции света в таком опыте связаны с тем, что длина волны видимого света очень мала. При $\lambda = 5 \cdot 10^{-5}$ см и расстоянии d между отверстиями S_1 и S_2 , равном всего 0,5 мм, ширина интерференционных полос составляет только 1 мм при удалении экрана С на 1 м от отверстий. Измеряя ширину интерференционных полос, Юнг в 1802 г. впервые определил длины световых волн для разных цветов, хотя эти измерения и не были точными.

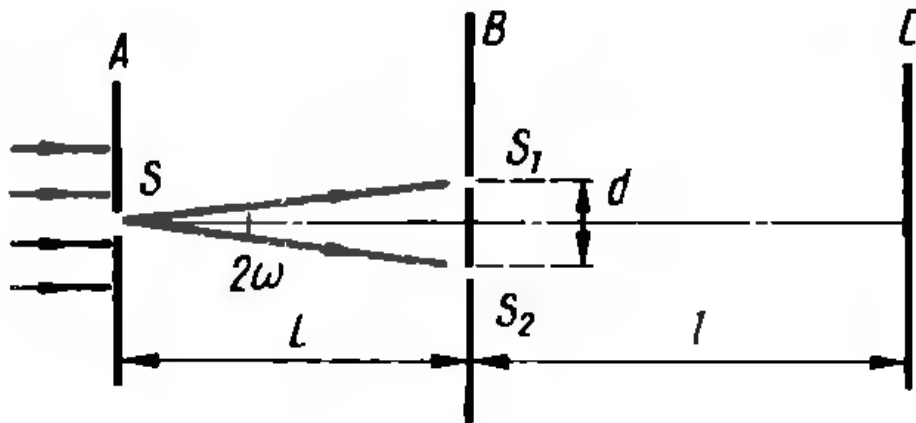


Рисунок 128 - Схема опыта Юнга

Введение дополнительного отверстия S (оно необходимо для когерентного возбуждения источников S_1 и S_2) резко уменьшает световой поток, что также затрудняет осуществление этого опыта. Интенсивность наблюдаемой в опыте Юнга интерференционной картины можно заметно увеличить, если вместо точечных отверстий S , S_1 и S_2 в экранах применить узкие длинные параллельные между собой щели. Вид полос вблизи центра интерференционного поля будет при этом таким же, как и при использовании точечных отверстий. Если точечное отверстие S перемещать перпендикулярно плоскости чертежа на рисунке 128, то интерференционные полосы на экране C , получаемые от точечных отверстий S_1 и S_2 , будут просто смещаться вдоль своих направлений, т. е. также перпендикулярно плоскости чертежа. Поэтому замена отверстия S длинной щелью, т. е. непрерывной цепочкой точечных некогерентных источников, не приведет к ухудшению четкости интерференционных полос по крайней мере в той области, где их кривизна незначительна. Аналогично, не ухудшит четкости и замена отверстий S_1 и S_2 на узкие длинные щели, перпендикулярные плоскости чертежа на рисунке 128. Увеличение же размера первого отверстия или щели S в плоскости чертежа (т. е. увеличение ширины) неизбежно приводит к уменьшению контрастности (видности) интерференционных полос

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}. \quad (326)$$

2.4.7 Поляризация

Следствием теории Максвелла является поперечность световых волн: векторы напряженностей электрического E и магнитного H полей волны взаимно перпендикулярны и колеблются перпендикулярно вектору скорости v распространения волны (перпендикулярно лучу). Поэтому для описания закономерностей поляризации света достаточно знать поведение лишь одного

из векторов. Обычно все рассуждения ведутся относительно светового вектора — вектора напряженности E электрического поля (это название обусловлено тем, что при действии света на вещество основное значение имеет электрическая составляющая поля волны, действующая на электроны в атомах вещества).

Свет представляет собой суммарное электромагнитное излучение множества атомов. Атомы же излучают световые волны независимо друг от друга, поэтому световая волна, излучаемая телом в целом, характеризуется всевозможными равновероятными колебаниями светового вектора (см. рисунок 80, а; луч перпендикулярен плоскости рисунка). В данном случае равномерное распределение векторов E объясняется большим числом атомарных излучателей, а равенство амплитудных значений векторов E — одинаковой (в среднем) интенсивностью излучения каждого из атомов. Свет со всевозможными равновероятными ориентациями вектора E (и, следовательно, H) называется естественным.

Свет, в котором направления колебаний светового вектора каким-то образом упорядочены, называется поляризованным. Так, если в результате каких-либо внешних воздействий появляется преимущественное (но не исключительное!) направление колебаний вектора E (см. рисунок 129, б), то имеем дело с частично поляризованным светом. Свет, в котором вектор E (и, следовательно, H) колеблется только в одном направлении, перпендикулярном лучу (см. рисунок 129, в), называется плоскополяризованным (линейно поляризованным).

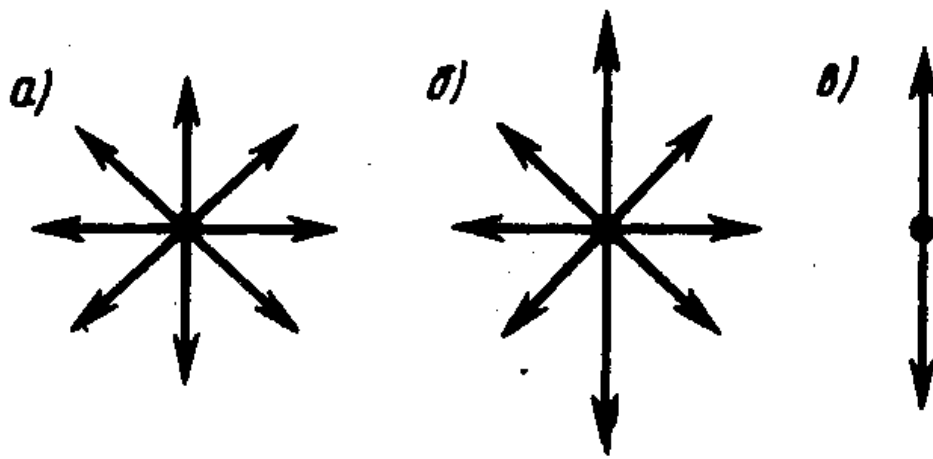


Рисунок 129 - Естественный и поляризованный свет

Плоскость, проходящая через направление колебаний светового вектора плоскополяризованной волны и направление распространения этой волны, называется плоскостью поляризации. Плоскополяризованный свет является предельным случаем эллиптически поляризованного света — света, для которого вектор E (вектор H) изменяется со временем так, что его конец описывает эллипс, лежащий в плоскости, перпендикулярной лучу. Если эллипс

поляризации вырождается в прямую (при разности фаз φ , равной нулю или π), то имеем дело с рассмотренным выше плоскополяризованным светом, если в окружность (при $\varphi = \pm\pi/2$ и равенстве амплитуд складываемых волн), то имеем дело с циркулярно поляризованным (поляризованным по кругу) светом.

Степенью поляризации называется величина

$$P = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (327)$$

где $I_{\max}$, и $I_{\min}$ — соответственно максимальная и минимальная интенсивности частично поляризованного света, пропускаемого анализатором. Для естественного света $I_{\max} = I_{\min}$ и $P=0$, для плоскополяризованного $I_{\min} = 0$ и $P=1$.

Естественный свет можно преобразовать в плоскополяризованный, используя так называемые поляризаторы, пропускающие колебания только определенного направления (например, пропускающие колебания, параллельные главной плоскости поляризатора, и полностью задерживающие колебания, перпендикулярные этой плоскости). В качестве поляризаторов могут быть использованы среды, анизотропные в отношении колебаний вектора E , например кристаллы. Из природных кристаллов, давно используемых в качестве поляризатора, следует отметить турмалин.

Рассмотрим классические опыты с турмалином (см. рисунок 112). Направим естественный свет перпендикулярно пластинке турмалина T_1 , вырезанной параллельно так называемой оптической оси OO' . Вращая кристалл T_1 вокруг направления луча, никаких изменений интенсивности прошедшего через турмалин света не наблюдаем. Если на пути луча поставить вторую пластинку турмалина T_2 и вращать ее вокруг направления луча, то интенсивность света, прошедшего через пластинки, меняется в зависимости от угла α между оптическими осями кристаллов по закону Малюса:

$$I = I_0 \cos^2 \alpha \quad (328)$$

где I_0 и I — соответственно интенсивности света, падающего на второй кристалл и вышедшего из него.

Следовательно, интенсивность прошедшего через пластинки света изменится от минимума (полное гашение света) при $\alpha = \pi/2$ (оптические оси пластинок перпендикулярны) до максимума при $\alpha = 0$ (оптические оси пластинок параллельны). Однако, как это следует из рисунка 131, амплитуда E световых колебаний, прошедших через пластинку T_2 , будет меньше амплитуды световых колебаний E_0 , падающих на пластинку T_2 .

$$E = E_0 \cos \alpha \quad (329)$$

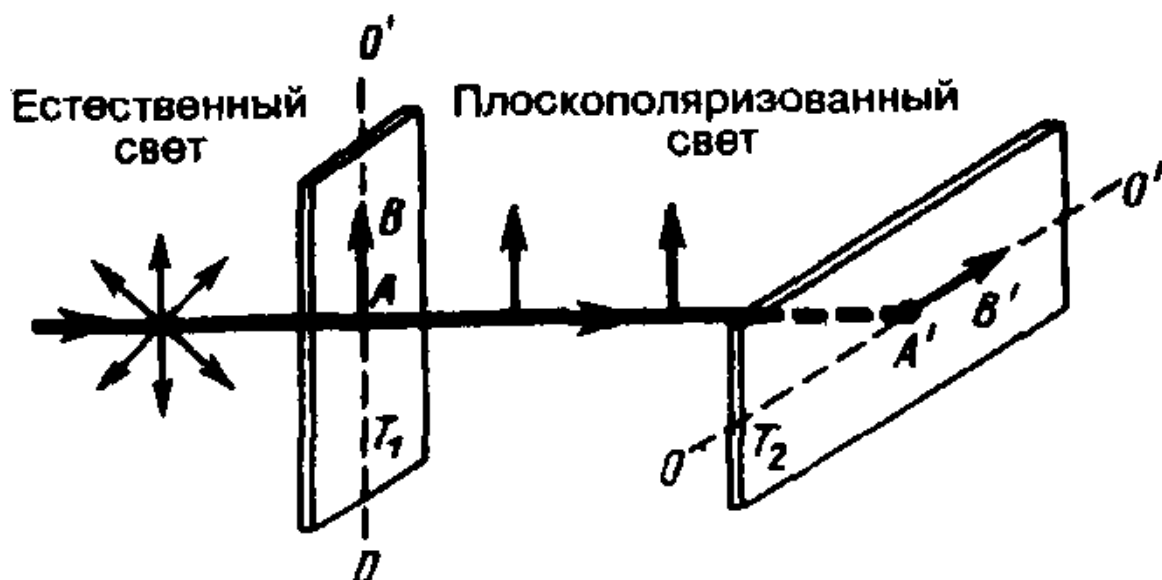


Рисунок 130 - Опыты с кристаллами турмалина

Так как интенсивность света пропорциональна квадрату амплитуды, то и получается выражение (328).

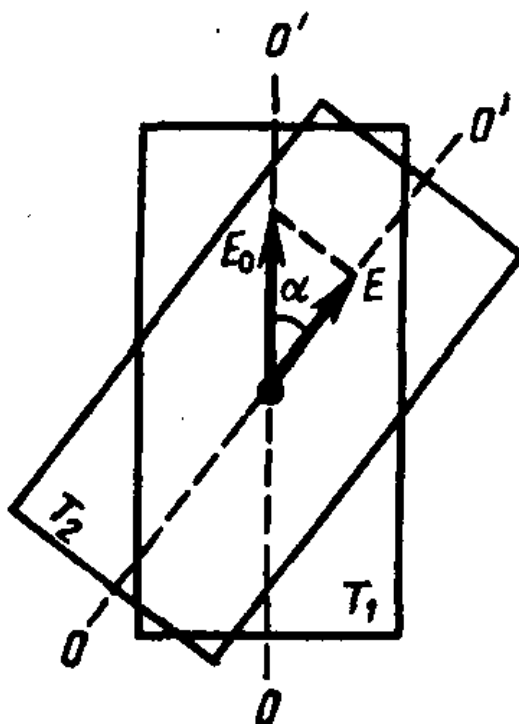


Рисунок 131 - Амплитуды векторов при прохождении через турмалин

Результаты опытов с кристаллами турмалина объясняются довольно просто, если исходить из изложенных выше условий пропускания света поляризатором. Первая пластинка турмалина пропускает колебания только определенного направления (на рисунке 130 это направление показано стрелкой AB), т. е. преобразует естественный свет в плоскополяризованный. Вторая же пластинка турмалина в зависимости от ее ориентации из

поляризованного света пропускает большую или меньшую его часть, которая соответствует компоненту E , параллельному оси второго турмалина. На рисунке 130 обе пластинки расположены так, что направления пропускаемых ими колебаний AB и $A'B'$ перпендикулярны друг другу. В данном случае T_1 пропускает колебания, направленные по AB , а T_2 их полностью гасит, т.е. за вторую пластинку турмалина свет не проходит.

Пластика T_1 , преобразующая естественный свет в плоскополяризованный, является поляризатором. Пластика T_2 , служащая для анализа степени поляризации света, называется анализатором. Обе пластинки совершенно одинаковы (их можно поменять местами).

Если пропустить естественный свет через два поляризатора, главные плоскости которых образуют угол α , то из первого выйдет плоскополяризованный свет, интенсивность которого $I_0 = \frac{1}{2} I_{\text{ест}}$, из второго, согласно (328), выйдет свет интенсивностью $I = I_0 \cos^2 \alpha$. Следовательно, интенсивность света, прошедшего через два поляризатора,

$$I = \frac{1}{2} I_{\text{ест}} \cos^2 \alpha \quad (330)$$

откуда $I_0 = \frac{1}{2} I_{\text{ест}}$ (поляризаторы параллельны) и $I_{\min} = 0$ (поляризаторы скрещены).

Если естественный свет падает на границу раздела двух диэлектриков (например, воздуха и стекла), то часть его отражается, а часть преломляется и распространяется во второй среде. Устанавливая на пути отраженного и преломленного лучей анализатор (например, турмалин), убеждаемся в том, что отраженный и преломленный лучи частично поляризованы: при поворачивании анализатора вокруг лучей интенсивность света периодически усиливается и ослабевает (полного гашения не наблюдается!). Дальнейшие исследования показали, что в отраженном луче преобладают колебания, перпендикулярные плоскости падения (на рисунке 132 они обозначены точками), в преломленном — колебания, параллельные плоскости падения (изображены стрелками).

Степень поляризации (степень выделения световых волн с определенной ориентацией электрического (и магнитного) вектора) зависит от угла падения лучей и показателя преломления. Шотландский физик Д. Брюстер установил закон, согласно которому при угле падения i_B (угол Брюстера), определяемого соотношением

$$\operatorname{tg} i_B = n_{12} \quad (331)$$

(n_{21} — показатель преломления второй среды относительно первой), отраженный луч является плоскополяризованным (содержит только колебания, перпендикулярные плоскости падения) (см. рисунок 115). Преломленный же луч при угле падения i_B поляризуется максимально, но не полностью.

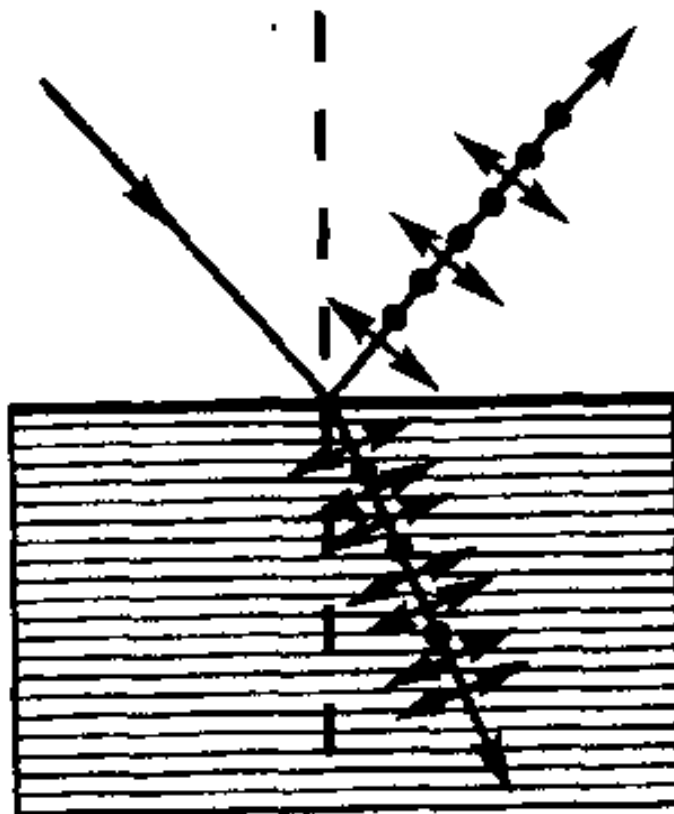


Рисунок 132 - Поляризация при отражении и преломлении

Если свет падает на границу раздела под углом Брюстера, то отраженный и преломленный лучи взаимно перпендикулярны ($\text{tg} i_B = \sin i_B / \cos i_B$, $n_{21} = \sin i_B / \sin i_2$ (i_2 — угол преломления), откуда $\cos i_B = \sin i_2$). Следовательно, $i_B + i_2 = \pi/2$, но $i'_B = i_B$ (закон отражения), поэтому $i'_B + i_2 = \pi/2$.

Степень поляризации отраженного и преломленного света при различных углах падения можно рассчитать из уравнений Максвелла, если учесть граничные условия для электромагнитного поля на границе раздела двух изотропных диэлектриков (так называемые формулы Френеля).

Степень поляризации преломленного света может быть значительно повышена (многократным преломлением при условии падения света каждый раз на границу раздела под углом Брюстера). Если, например, для стекла ($n = 1,53$) степень поляризации преломленного луча составляет $\approx 15\%$, то после преломления на 8—10 наложенных друг на друга стеклянных пластинок вышедший из такой системы свет будет практически полностью поляризованным. Такая совокупность пластинок называется стопой. Стопа может служить для анализа поляризованного света как при его отражении, так и при его преломлении.

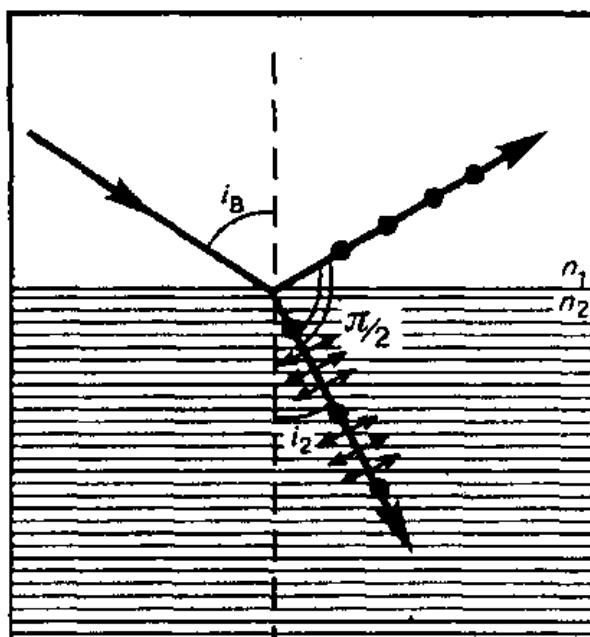


Рисунок 115 - Угол Брюстера

Все прозрачные кристаллы (кроме кристаллов кубической системы, которые оптически изотропны) обладают способностью двойного лучепреломления, т. е. раздваивания каждого падающего на них светового пучка. Это явление, в 1669 г. впервые обнаруженное датским ученым Э. Бартолином для исландского шпата (разновидность кальцита CaCO_3), объясняется особенностями распространения света в анизотропных средах и непосредственно вытекает из уравнений Максвелла.

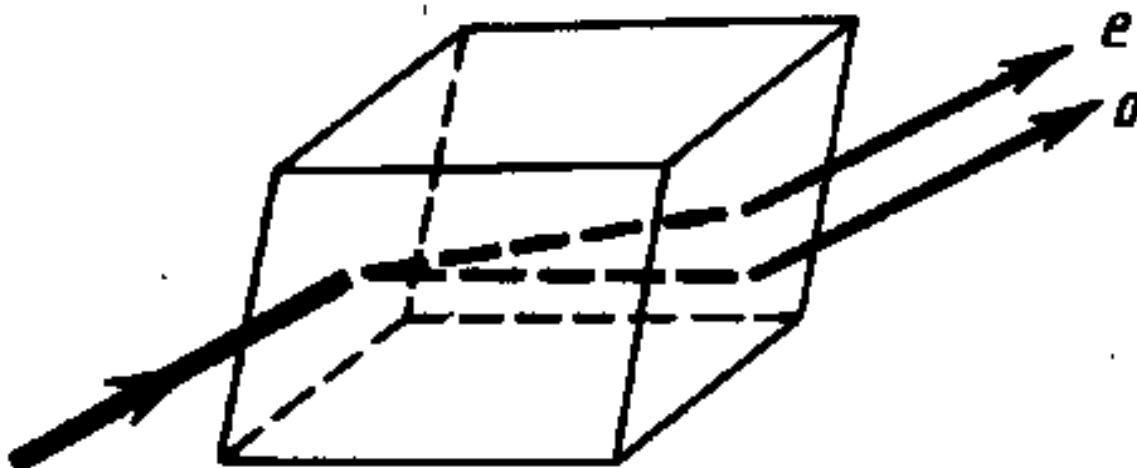


Рисунок 116 - Двойное лучепреломление

Если на толстый кристалл исландского шпата направить узкий пучок света, то из кристалла выйдут два пространственно разделенных луча, параллельных друг другу и падающему лучу (см. рисунок 116). Даже в том случае, когда первичный пучок падает на кристалл нормально, преломленный

пучок разделяется на два, причем один из них является продолжением первичного, а второй отклоняется (см. рисунок 117). Второй из этих лучей получил название необыкновенного (е), а первый — обыкновенного (о).

В кристалле исландского шпата имеется единственное направление, вдоль которого двойное лучепреломление не наблюдается. Направление в оптически анизотропном кристалле, по которому луч света распространяется, не испытывая двойного лучепреломления, называется оптической осью кристалла. В данном случае речь идет именно о направлении, а не о прямой линии, проходящей через какую-то точку кристалла. Любая прямая, проходящая параллельно данному направлению, является оптической осью кристалла. Кристаллы в зависимости от типа их симметрии бывают одноосные и двуосные, т.е. имеют одну или две оптические оси (к первым и относится исландский шпат).

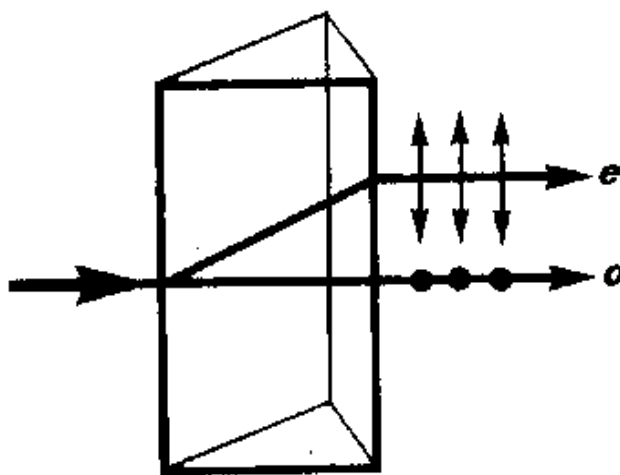


Рисунок 117 - Поляризация при двойном лучепреломлении

Исследования показывают, что вышедшие из кристалла лучи плоскополяризованы во взаимно перпендикулярных плоскостях. Плоскость, проходящая через направление луча света и оптическую ось кристалла, называется главной плоскостью (или главным сечением кристалла). Колебания светового вектора (вектора напряженности E электрического поля) в обыкновенном луче происходят перпендикулярно главной плоскости, в необыкновенном — в главной плоскости (см. рисунок 117).

Неодинаковое преломление обыкновенного и необыкновенного лучей указывает на различие для них показателей преломления. Очевидно, что при любом направлении обыкновенного луча колебания светового вектора перпендикулярны оптической оси кристалла, поэтому обыкновенный луч распространяется по всем направлениям с одинаковой скоростью и, следовательно, показатель преломления n_o для него есть величина постоянная. Для необыкновенного же луча угол между направлением колебаний светового вектора и оптической осью отличен от прямого и зависит от направления луча, поэтому необыкновенные лучи распространяются по различным направлениям

с разными скоростями. Следовательно, показатель преломления n_e необыкновенного луча является переменной величиной, зависящей от направления луча. Таким образом, обыкновенный луч подчиняется закону преломления (отсюда и название «обыкновенный»), а для необыкновенного луча этот закон не выполняется. После выхода из кристалла, если не принимать во внимание поляризацию во взаимно перпендикулярных плоскостях, эти два луча ничем друг от друга не отличаются.

Как уже рассматривалось, обыкновенные лучи распространяются в кристалле по всем направлениям с одинаковой скоростью $v_o = c/n_o$, а необыкновенные — с разной скоростью $v_e = c/n_e$ (в зависимости от угла между вектором E и оптической осью). Для луча, распространяющегося вдоль оптической оси, $n_o = n_e$, $v_o = v_e$, т.е. вдоль оптической оси существует только одна скорость распространения света. Различие в v_e и v_o для всех направлений, кроме направления оптической оси, и обуславливает явление двойного лучепреломления света в одноосных кристаллах.

Допустим, что в точке S внутри одноосного кристалла находится точечный источник света. На рисунке 118 показано распространение обыкновенного и необыкновенного лучей в кристалле (главная плоскость совпадает с плоскостью чертежа, OO' — направление оптической оси). Волновой поверхностью обыкновенного луча (он распространяется с $v_o = \text{const}$) является сфера, необыкновенного луча ($v_e \neq \text{const}$) — эллипсоид вращения. Наибольшее расхождение волновых поверхностей обыкновенного и необыкновенного лучей наблюдается в направлении, перпендикулярном оптической оси. Эллипсоид и сфера касаются друг друга в точках их пересечения с оптической осью OO' . Если $v_e < v_o$ ($n_e > n_o$), то эллипсоид необыкновенного луча вписан в сферу обыкновенного луча (эллипсоид скоростей вытянут относительно оптической оси) и одноосный кристалл называется положительным (см. рисунок 118, а). Если $v_e > v_o$ ($n_e < n_o$), то эллипсоид описан вокруг сферы (эллипсоид скоростей растянут в направлении, перпендикулярном оптической оси) и одноосный кристалл называется отрицательным (см. рисунок 118, б). Рассмотренный выше исландский шпат относится к отрицательным кристаллам.

В качестве примера построения обыкновенного и необыкновенного лучей рассмотрим преломление плоской волны на границе анизотропной среды, например положительной (см. рисунок 119). Пусть свет падает нормально к преломляющей грани кристалла, а оптическая ось OO' составляет с ней некоторый угол. С центрами в точках A и B построим сферические волновые поверхности, соответствующие обыкновенному лучу, и эллипсоидальные — необыкновенному лучу. В точке, лежащей на OO' , эти поверхности соприкасаются. Согласно принципу Гюйгенса, поверхность, касательная к сферам, будет фронтом (а—а) обыкновенной волны, поверхность, касательная к эллипсоидам, — фронтом (б—б) необыкновенной волны. Проведя к точкам касания прямые, получим направления распространения обыкновенного (о) и необыкновенного (е) лучей. Таким образом, в данном случае обыкновенный

луч пойдет вдоль первоначального направления, необыкновенный же отклонится от первоначального направления.

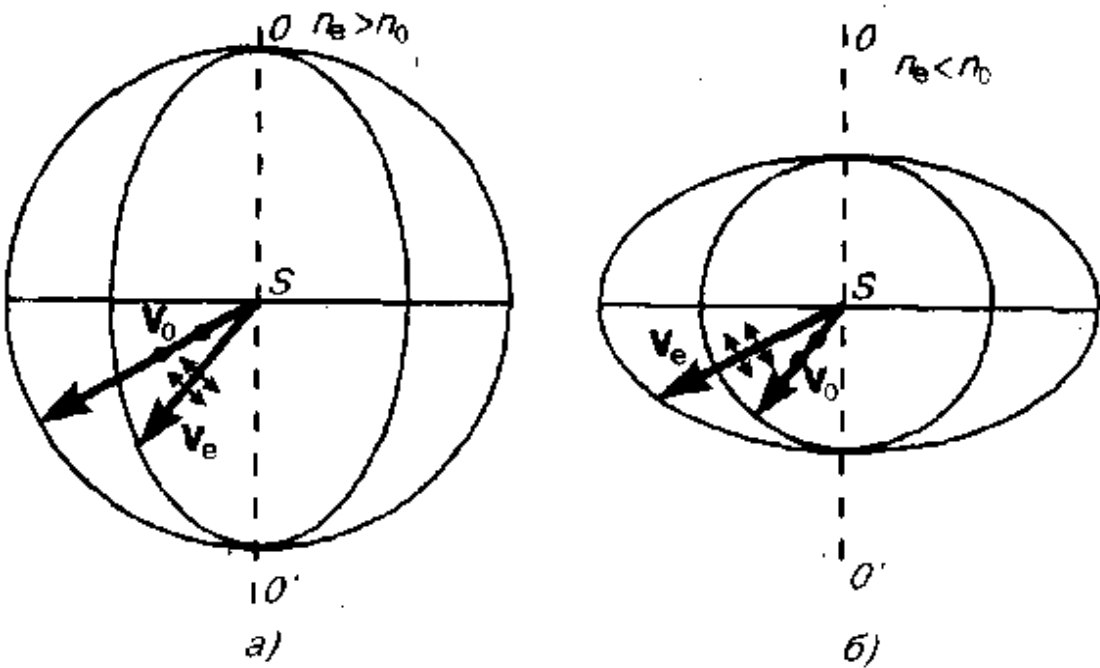


Рисунок 118 - Круговая и эллиптическая поляризация

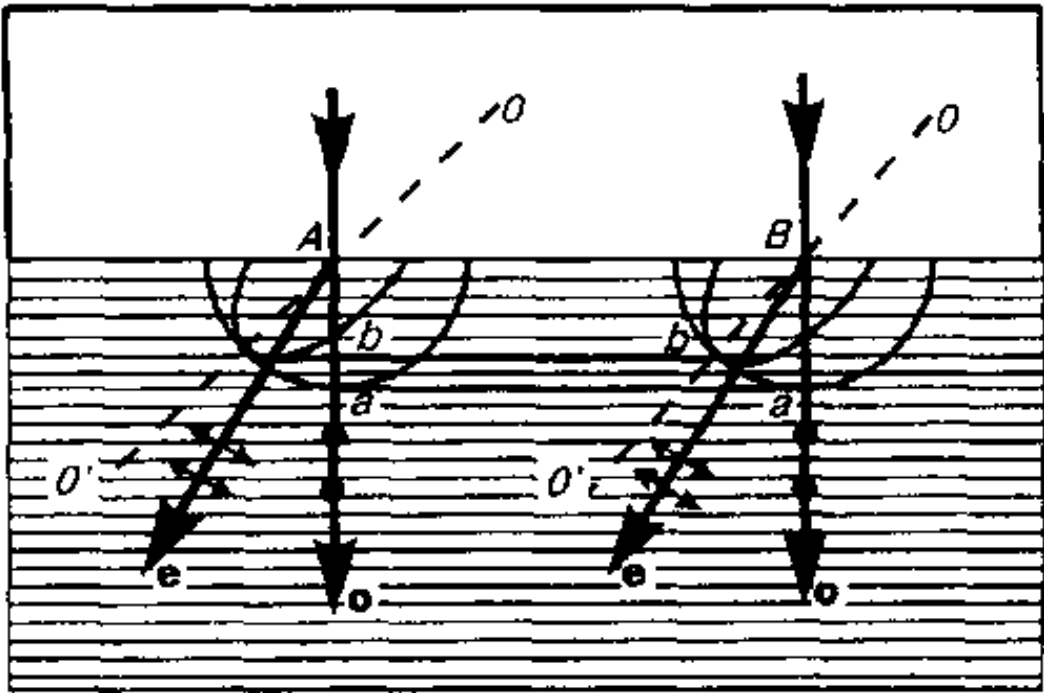


Рисунок 119 - Преломление плоской волны на границе анизотропной среды

В основе работы поляризационных приспособлений, служащих для получения поляризованного света, лежит явление двойного лучепреломления. Наиболее часто для этого применяются призмы и поляроиды. Призмы делятся на два класса:

- 1) призмы, дающие только плоскополяризованный луч (поляризационные призмы);
- 2) призмы, дающие два поляризованных во взаимно перпендикулярных плоскостях луча (двоякопреломляющие призмы).

Поляризационные призмы построены по принципу полного отражения одного из лучей (например, обыкновенного) от границы раздела, в то время как другой луч с другим показателем преломления проходит через эту границу. Типичным представителем поляризационных призм является призма Николя, называемая часто ни²колем. Призма Николя (см. рисунок 120) представляет собой двойную призму из исландского шпата, склеенную вдоль линии АВ канадским бальзамом с $n=1,55$. Оптическая ось ОО' призмы составляет с входной гранью угол 48° . На передней грани призмы естественный луч, параллельный ребру СВ, раздваивается на два луча: обыкновенный ($n_o=1,66$) и необыкновенный ($n_e=1,51$). При соответствующем подборе угла падения, равного или большего предельного, обыкновенный луч испытывает полное отражение (канадский бальзам для него является средой оптически менее плотной), а затем поглощается зачерненной боковой поверхностью СВ. Необыкновенный луч выходит из кристалла параллельно падающему лучу, незначительно смещенному относительно него (ввиду преломления на наклонных гранях АС и ВD).

Двоякопреломляющие призмы используют различие в показателях преломления обыкновенного и необыкновенного лучей, чтобы развести их возможно дальше друг от друга. Примером двоякопреломляющих призм могут служить призмы из исландского шпата и стекла, призмы, составленные из двух призм из исландского шпата со взаимно перпендикулярными оптическими осями. Для первых призм (см. рисунок 90) обыкновенный луч преломляется в шпате и стекле два раза и, следовательно, сильно отклоняется, необыкновенный же луч при соответствующем подборе показателя преломления стекла n ($n \approx n_e$) проходит призму почти без отклонения. Для вторых призм различие в ориентировке оптических осей влияет на угол расхождения между обыкновенным и необыкновенным лучами.

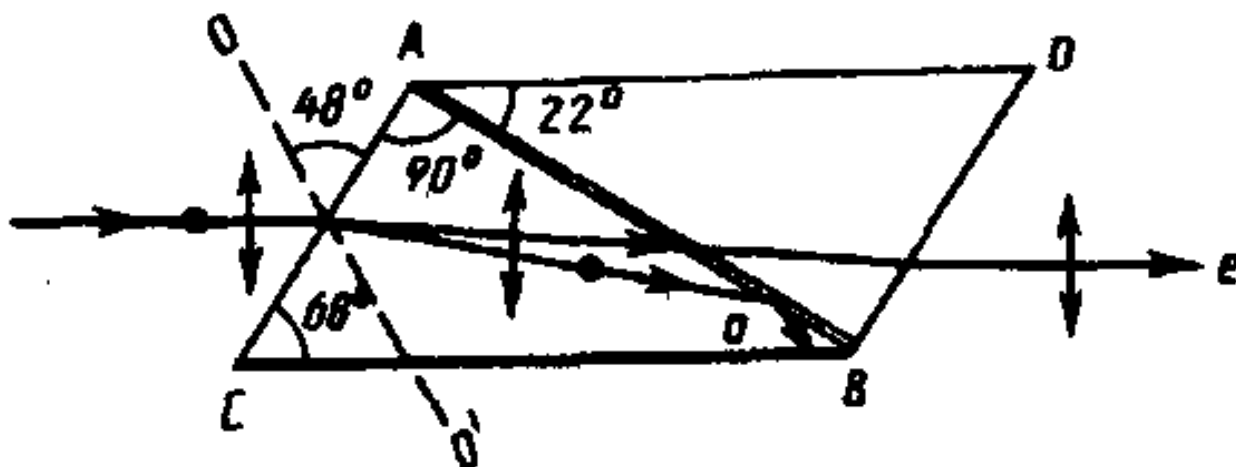


Рисунок 120 - Призма Николя

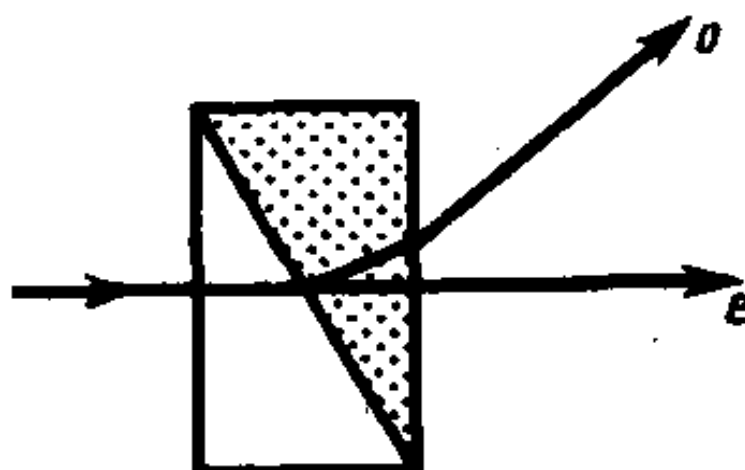


Рисунок 121 - Двоякопреломляющая призма

Двоякопреломляющие кристаллы обладают свойством дихроизма, т. е. различного поглощения света в зависимости от ориентации электрического вектора световой волны, и называются дихроичными кристаллами. Примером сильно дихроичного кристалла является турмалин, в котором из-за сильного селективного поглощения обыкновенного луча уже при толщине пластинки 1 мм из нее выходит только необыкновенный луч. Такое различие в поглощении, зависящее, кроме того, от длины волны, приводит к тому, что при освещении дихроичного кристалла белым светом кристалл по разным направлениям оказывается различно окрашенным.

Дихроичные кристаллы приобрели еще более важное значение в связи с изобретением поляроидов. Примером поляроида может служить тонкая пленка из целлулоида, в которую вкраплены кристаллики герапатита (сернокислого

иод-хинина). Герапатит — двоякопреломляющее вещество с очень сильно выраженным дихроизмом в области видимого света. Установлено, что такая пленка уже при толщине $\approx 0,1$ мм полностью поглощает обыкновенные лучи видимой области спектра, являясь в таком тонком слое совершенным поляризатором. Преимущество поляроидов перед призмами — возможность изготавливать их с площадями поверхностей до нескольких квадратных метров. Однако степень поляризации в них сильнее зависит от λ , чем в призмах. Кроме того, их меньшая по сравнению с призмами прозрачность (приблизительно 30%) в сочетании с небольшой термостойкостью не позволяет использовать поляроиды в мощных световых потоках. Поляроиды применяются, например, для защиты от ослепляющего действия солнечных лучей и фар встречного автотранспорта.

Разные кристаллы создают различное по значению и направлению двойное лучепреломление, поэтому, пропуская через них поляризованный свет и измеряя изменение его интенсивности после прохождения кристаллов, можно определить их оптические характеристики и производить минералогический анализ. Для этой цели используются поляризационные микроскопы.

Пусть на кристаллическую пластинку, вырезанную параллельно оптической оси, нормально падает плоскополяризованный свет (см. рисунок 122). Внутри пластинки он разбивается на обыкновенный (о) и необыкновенный (е) лучи, которые в кристалле пространственно не разделены (но движутся с разными скоростями), а на выходе из кристалла складываются.

Так как в обыкновенном и необыкновенном лучах колебания светового вектора совершаются во взаимно перпендикулярных направлениях, то на выходе из пластинки в результате сложения этих колебаний возникают световые волны, вектор E (а следовательно, и H) в которых меняется со временем так, что его конец описывает эллипс, ориентированный произвольно относительно координатных осей. Уравнение этого эллипса:

$$\frac{x^2}{E_o^2} - \frac{2xy}{E_o E_e} + \frac{y^2}{E_e^2} = \sin^2 \varphi \quad (332)$$

где E_o и E_e — соответственно составляющие напряженности электрического поля волны в обыкновенном и необыкновенном лучах, φ — разность фаз колебаний. Таким образом, в результате прохождения через кристаллическую пластинку плоскополяризованный свет превращается в эллиптически поляризованный.

Между обыкновенным и необыкновенным лучами в пластинке возникает оптическая разность хода

$$\Delta = (n_o - n_e)d \quad (333)$$

или разность фаз

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0} (n_o - n_e) d \quad (334)$$

где d — толщина пластинки, λ_0 — длина волны света в вакууме.

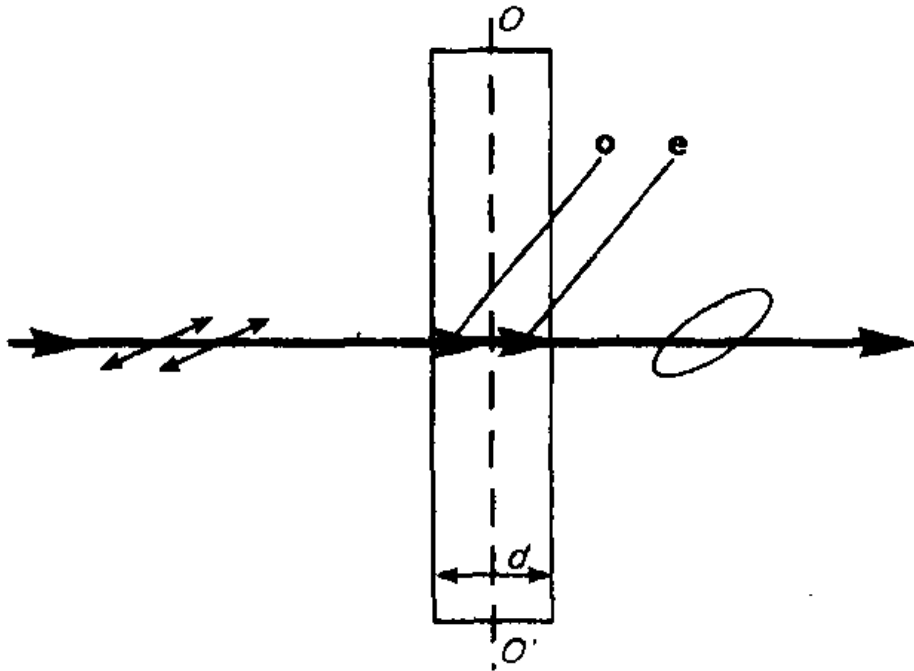


Рисунок 122 - Создание эллиптически поляризованного света

Если $\Delta = (n_o - n_e) d = \lambda/4$, $\varphi = \pm\pi/2$, то уравнение (334) примет вид

$$\frac{x^2}{E_o^2} + \frac{y^2}{E_e^2} = 1 \quad (335)$$

т. е. эллипс ориентирован относительно главных осей кристалла. При $E_o = E_e$, (если световой вектор в падающем на пластинку плоскополяризованном свете составляет угол $\alpha = 45^\circ$ с направлением оптической оси пластинки)

$$x^2 + y^2 = E_o^2 \quad (336)$$

т. е. на выходе из пластинки свет оказывается циркулярно поляризованным.

Вырезанная параллельно оптической оси пластинка, для которой оптическая разность хода

$$\Delta = (n_o - n_e) d = \pm(m + 1/4)\lambda_0 \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (337)$$

называется пластинкой в четверть волны (пластинкой $\lambda/4$). Знак плюс соответствует отрицательным кристаллам, минус — положительным. Плоскополяризованный свет, пройдя пластинку $\lambda/4$, на выходе превращается в эллиптически поляризованный (в частном случае циркулярно поляризованный).

Конечный результат, как уже рассматривали, определяется разностью фаз φ и углом α . Пластина, для которой

$$(n_o - n_e)d = \pm(m + 1/2)\lambda_0 \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (338)$$

называется пластинкой в полволны и т. д.

В циркулярно поляризованном свете разность фаз φ между любыми двумя взаимно перпендикулярными колебаниями равна $\pm\pi/2$. Если на пути такого света поставить пластинку $\lambda/4$, то она внесет дополнительную разность фаз $\pm\pi/2$. Результирующая разность фаз станет равной 0 или π . Следовательно (см. формулу (332)), циркулярно поляризованный свет, пройдя пластинку $\lambda/4$, становится плоскополяризованным. Если теперь на пути луча поставить поляризатор, то можно добиться полного его гашения. Если же падающий свет естественный, то он при прохождении пластинки $\lambda/4$ таковым и останется (ни при каком положении пластинки и поляризатора погашения луча не достичь).

Таким образом, если при вращении поляризатора при любом положении пластинки интенсивность не меняется, то падающий свет естественный. Если интенсивность меняется и можно достичь полного гашения луча, то падающий свет циркулярно поляризованный; если полного гашения не достичь, то падающий свет представляет смесь естественного и циркулярно поляризованного.

Если на пути эллиптически поляризованного света поместить пластинку $\lambda/4$, оптическая ось которой ориентирована параллельно одной из осей эллипса, то она внесет дополнительную разность фаз $\pm\pi/2$. Результирующая разность фаз станет равной нулю или π . Следовательно, эллиптически поляризованный свет, пройдя пластинку $\lambda/4$, повернутую определенным образом, превращается в плоскополяризованный и может быть погашен поворотом поляризатора. Этим методом можно отличить эллиптически поляризованный свет от частично поляризованного или циркулярно поляризованный свет от естественного.

Двойное лучепреломление имеет место в естественных анизотропных средах. Существуют, однако, различные способы получения искусственной оптической анизотропии, т. е. сообщения оптической анизотропии естественно изотропным веществам.

Оптически изотропные вещества становятся оптически анизотропными под действием: 1) одностороннего сжатия или растяжения (кристаллы кубической системы, стекла и др.); 2) электрического поля (эффект Керра; жидкости, аморфные тела, газы); 3) магнитного поля (жидкости, стекла, коллоиды). В перечисленных случаях вещество приобретает свойства одноосного кристалла, оптическая ось которого совпадает с направлением деформации, электрического или магнитного полей соответственно указанным выше воздействиям.

Мерой возникающей оптической анизотропии служит разность показателей преломления обыкновенного и необыкновенного лучей в направлении, перпендикулярном оптической оси:

$$\begin{aligned}
n_o - n_e &= k_1 \sigma \text{ (в случае деформации)} \\
n_o - n_e &= k_2 E^2 \text{ (в случае электрического поля)} \\
n_o - n_e &= k_3 E^3 \text{ (в случае магнитного поля)}
\end{aligned}
\tag{339}$$

где k_1, k_2, k_3 — постоянные, характеризующие вещество, σ — нормальное напряжение, E и H — соответственно напряженность электрического и магнитного полей.

На рисунке 123 приведена установка для наблюдения эффекта Керра в жидкостях (установки для изучения рассмотренных явлений однотипны). Ячейка Керра — кювета с жидкостью (например, нитробензолом), в которую введены пластины конденсатора, помещается между скрещенными поляризатором P и анализатором A . При отсутствии электрического поля свет через систему не проходит. При наложении электрического поля жидкость становится двоякопреломляющей; при изменении разности потенциалов между электродами меняется степень анизотропии вещества, а следовательно, и интенсивность света, прошедшего через анализатор. На пути l между обыкновенным и необыкновенным лучами возникает оптическая разность хода

$$\Delta = l(n_o - n_e) = \frac{k_2}{E^2} \tag{340}$$

(с учетом формулы (339)) или соответственно разность фаз

$$\varphi = \frac{2\pi\Delta}{\lambda} = \frac{2\pi B}{E^2} \tag{341}$$

где $B = k_2/\lambda$ — постоянная Керра.

Эффект Керра — оптическая анизотропия веществ под действием электрического поля — объясняется различной поляризуемостью молекул жидкости по разным направлениям. Это явление практически безынерционно, т. е. время перехода вещества из изотропного состояния в анизотропное при включении поля (и обратно) составляет приблизительно 10^{-10} с. Поэтому ячейка Керра служит идеальным световым затвором и применяется в быстропротекающих процессах (звукозапись, воспроизводство звука, скоростная фото- и киносъемка, изучение скорости распространения света и т. д.), в оптической локации, в оптической телефонии и т. д.

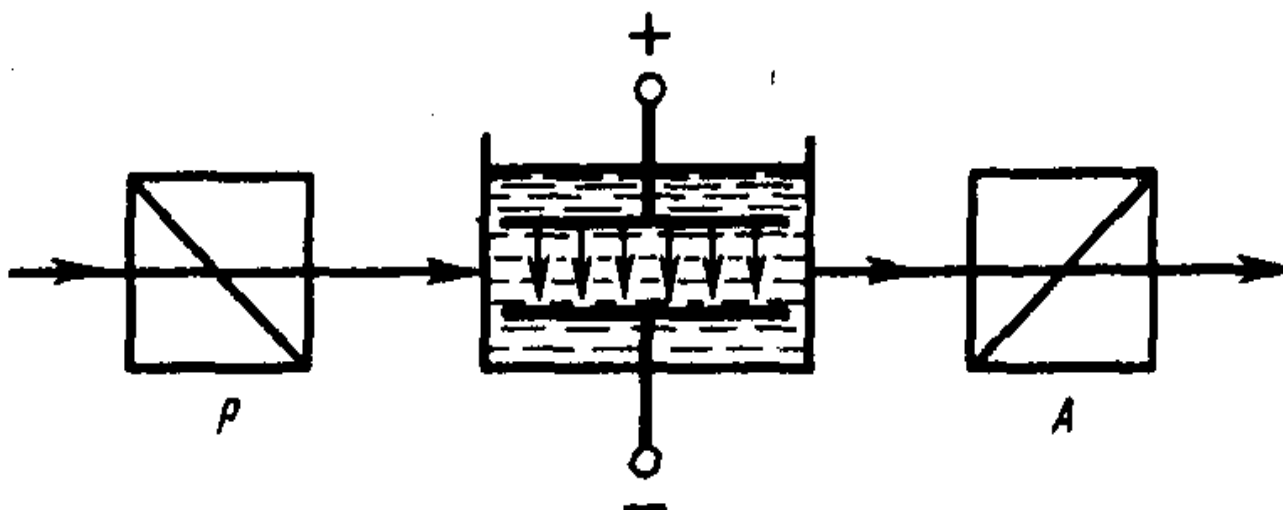


Рисунок 123 - Ячейка Керра

Искусственная анизотропия под действием механических воздействий позволяет исследовать напряжения, возникающие в прозрачных телах. В данном случае о степени деформации отдельных участков изделия (например, остаточных деформаций в стекле при закалке) судят по распределению в нем окраски. Так как применяемые обычно в технике материалы (металлы) непрозрачны, то исследование напряжений производят на прозрачных моделях, а потом делают соответствующий пересчет на проектируемую конструкцию.

Некоторые вещества (например, из твердых тел — кварц, сахар, киноварь, из жидкостей — водный раствор сахара, винная кислота, скипидар), называемые оптически активными, обладают способностью вращать плоскость поляризации.

Вращение плоскости поляризации можно наблюдать на следующем опыте. Если между скрещенными поляризатором Р и анализатором А, дающими темное поле зрения, поместить оптически активное вещество (например, кювету с раствором сахара), то поле зрения анализатора просветляется. При повороте анализатора на некоторый угол φ можно вновь получить темное поле зрения. Угол φ и есть угол, на который оптически активное вещество поворачивает плоскость поляризации света, прошедшего через поляризатор. Так как поворотом анализатора можно получить темное поле зрения, то свет, прошедший через оптически активное вещество, является плоскополяризованным.

Опыт показывает, что угол поворота плоскости поляризации для оптически активных кристаллов и чистых жидкостей

$$\varphi = \alpha d \quad (342)$$

для оптически активных растворов

$$\varphi = [\alpha]Cd \quad (343)$$

где d — расстояние, пройденное светом в оптически активном веществе, $\alpha([\alpha])$ — так называемое удельное вращение, численно равное углу поворота плоскости поляризации света слоем оптически активного вещества единичной толщины (единичной концентрации — для растворов), C — массовая концентрация оптически активного вещества в растворе, кг/м^3 . Удельное вращение зависит от природы вещества, температуры и длины волны света в вакууме.

Опыт показывает, что все вещества, оптически активные в жидком состоянии, обладают таким же свойством и в кристаллическом состоянии. Однако если вещества активны в кристаллическом состоянии, то не всегда активны в жидком (например, расплавленный кварц). Следовательно, оптическая активность обуславливается как строением молекул вещества (их асимметрией), так и особенностями расположения частиц в кристаллической решетке.

Оптически активные вещества в зависимости от направления вращения плоскости поляризации разделяются на право- и левовращающие. В первом случае плоскость поляризации, если смотреть навстречу лучу, вращается вправо (по часовой стрелке), во втором — влево (против часовой стрелки). Вращение плоскости поляризации объяснено О. Френелем (1817 г.). Согласно теории Френеля, скорость распространения света в оптически активных веществах различна для лучей, поляризованных по кругу вправо и влево.

Явление вращения плоскости поляризации и, в частности, формула (343) лежат в основе точного метода определения концентрации растворов оптически активных веществ, называемого поляриметрией (сахариметрией). По найденному углу поворота плоскости поляризации φ и известному значению $[\alpha]$ из (343) находится концентрация растворенного вещества.

Впоследствии М. Фарадеем было обнаружено вращение плоскости поляризации в оптически неактивных телах, возникающее под действием магнитного поля. Это явление получило название эффект Фарадея (или магнитного вращения плоскости поляризации). Оно имело огромное значение для науки, так как было первым явлением, в котором обнаружилась связь между оптическими и электромагнитными процессами.

2.5 КВАНТОВАЯ ФИЗИКА

2.5.1 Фотозффект

Влияние света на электрические процессы было открыто Г.Герцем. Облучая ультрафиолетовыми лучами цинковые электроды, находящиеся под напряжением, он в 1887 г. наблюдал ускорение процесса разряда (между пластинами проскакивала искра). Позднее Галвакс указал, что явление, которое

наблюдал Герц, обусловлено ионизацией окружающего электроды газа зарядами, вырванными под действием света.

Первое обстоятельное исследование фотоэффекта было выполнено в 1888—1890 гг. А. Г. Столетовым. Им было установлено, что под действием света тело теряет отрицательный заряд, что действие пропорционально световому потоку и вызывается преимущественно ультрафиолетовыми лучами, что явление протекает практически безынерционно. В 1898 г. Ленард и Томсон методом отклонения зарядов в электрическом и магнитном полях определили удельный заряд заряженных частиц, вырывааемых светом из катода, и получили выражение $e/m = -1,7588 \cdot 10^{11}$ Кл/кг, совпадающее с известным удельным зарядом электрона. Отсюда следовало, что под действием света происходит вырывание электронов из вещества катода. Явление это носит название фотоэлектрического эффекта или просто фотоэффекта.

Позднее открытый Герцем фотоэффект стали называть внешним, так как под действием света электроны выходят из исследуемой среды наружу, для полупроводников более характерны два других фотоэлектрических явления: внутренний и вентильный фотоэффекты. Также с появлением мощных источников оптического излучения (лазеров) стали различать однофотонный и многофотонный процессы при фотоэффекте.

Для исследования закономерностей фотоэффекта используют установку, схематически показанную на рисунке 124. В сосуде поддерживается высокий вакуум. При освещении металлической пластины **P** через кварцевое окно в цепи возникает ток (**фототок**), измеряемый гальванометром **G**. Явление в сильной степени зависит от чистоты освещаемой поверхности, поэтому в точных опытах используют свежие поверхности (срезы или поверхности, напылённые в вакууме). Для зависимости силы фототока от приложенного напряжения при неизменном световом потоке характерно существование участка тока насыщения $I_{\text{нас}}$ когда все освобождаемые светом электроны (**фотоэлектроны**) достигают анода, и участка нарастания, начинающегося при некотором значении задерживающего напряжения U_3 . По измерениям U_3 можно определить максимальную скорость v освобождаемых светом электронов с помощью соотношения $eU_3 = \frac{mv^2}{2}$.

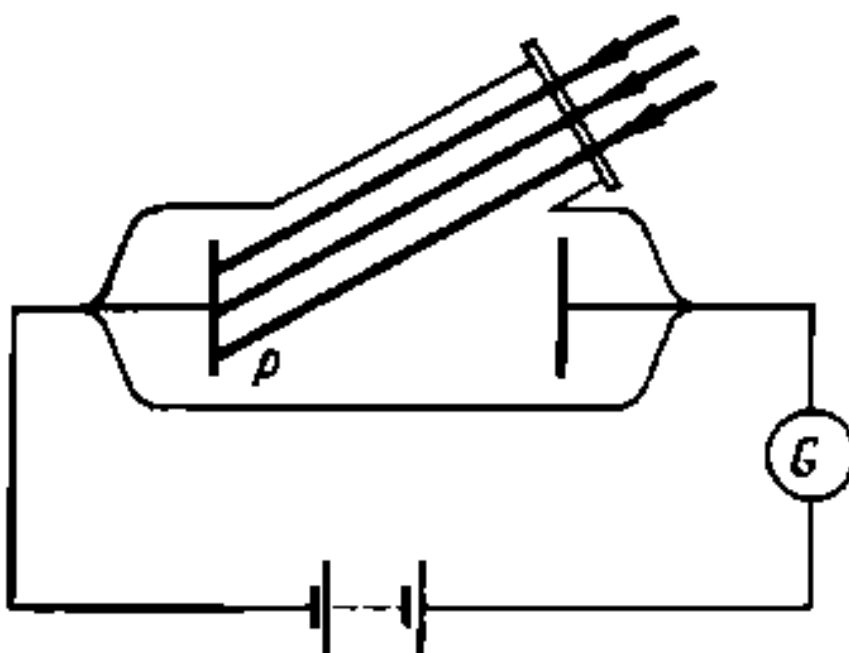


Рисунок 124 - Схема опыта для исследования фотоэффекта

Многочисленными экспериментами установлены следующие основные закономерности фотоэффекта:

- сила тока насыщения прямо пропорциональна падающему световому потоку (при неизменном спектральном составе). Этот закон проверен для очень широкого интервала интенсивностей. Отсюда следует, что число электронов, освобождаемых светом в 1 с, пропорционально мощности падающего излучения
- для каждого металла существует максимальная длина волны света (минимальная частота), при которой еще происходит освобождение электронов. Если длина волны превышает эту так называемую **красную границу фотоэффекта**, то эмиссия электронов отсутствует даже при сравнительно большой интенсивности облучающего света
- максимальная энергия фотоэлектронов линейно зависит от частоты со падающего света (см. рисунок 125) и не зависит от его интенсивности

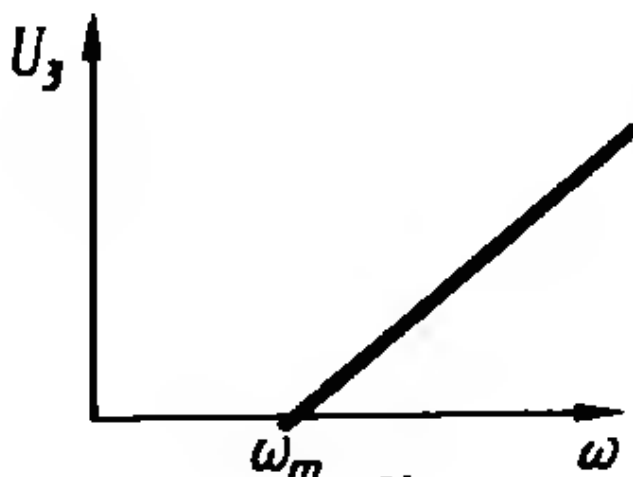


Рисунок 125 - Зависимость задерживаемого потенциала от частоты

Первую закономерность фотоэффекта, а также возникновение самого фотоэффекта легко объяснить, исходя из законов классической физики. С точки зрения классических волновых представлений о природе излучения сам факт освобождения электронов из металла неудивителен, так как падающая на поверхность электромагнитная волна вызывает вынужденные колебания электронов в металле. Поглощая энергию волны, электрон может накопить ее в количестве, достаточном для преодоления потенциального барьера, удерживающего электрон в металле (т. е. для совершения работы выхода). Если эта картина верна, то энергия фотоэлектрона должна находиться в прямой связи с интенсивностью падающего света. Но опыт показывает, что энергия фотоэлектронов совершенно не зависит от интенсивности света. Увеличение интенсивности приводит лишь к пропорциональному увеличению числа фотоэлектронов. Энергия же отдельного фотоэлектрона зависит только от частоты падающего света.

Более того, даже при очень малой интенсивности фотоэлектроны появляются практически сразу после начала освещения (безынерционно), хотя, по классическим представлениям, в таких условиях требуется конечное время, чтобы электрон мог накопить необходимую энергию.

Вторая и третья закономерности фотоэффекта законами классической физики не объясняются.

Изучая зависимость фототока (см. рисунок 126), возникшего при облучении металла потоком монохроматического света, от разности потенциалов между электродами (такая зависимость называется вольт-амперной характеристикой фототока), установили, что:

- фототок возникает не только при $U_A - U_K = 0$, но и при $U_A - U_K < 0$
- фототок отличен от нуля до строго определенного для данного металла отрицательного значения разности потенциалов $U_A - U_K < U_3$, так называемого задерживающего потенциала величина запирающего (задерживающего) потенциала не зависит от интенсивности падающего света фототок растет с уменьшением абсолютного значения задерживающего потенциала величина фототока растет с ростом $U_A - U_K$ и с какого-то определенного значения $U_A - U_K$ фототок (так называемый ток насыщения) становится постоянным величина тока насыщения растет с увеличением интенсивности падающего света величина задерживающего потенциала зависит от частоты падающего света скорость вырванных под действием света электронов не зависит от интенсивности света, а зависит только от его частоты

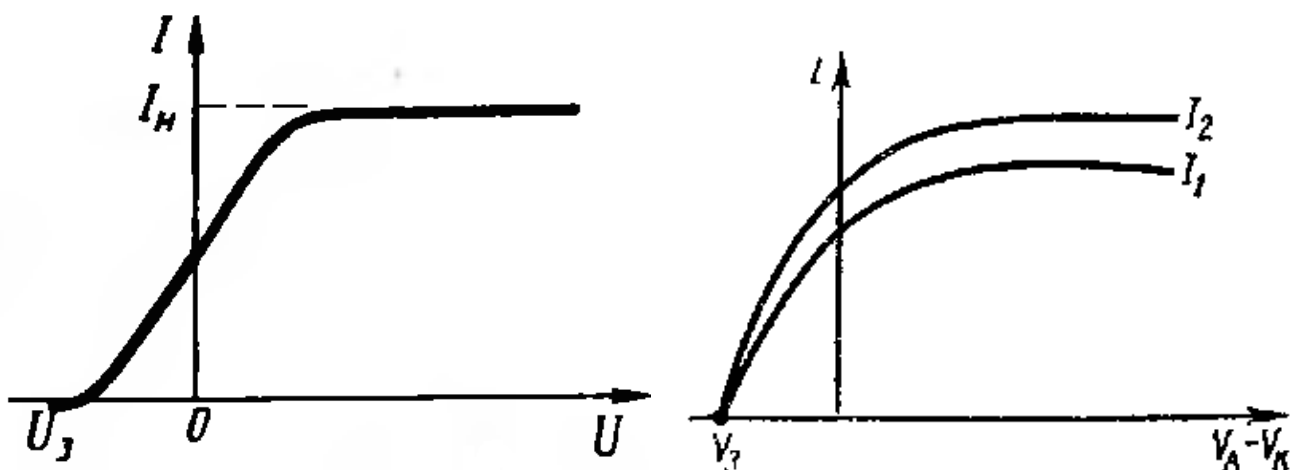


Рисунок 126 - Зависимость фототока от разности потенциалов и семейство ВАХ при разных интенсивностях

Эти экспериментальные факты затем были сформулированы в законы фотоэффекта.

Явление фотоэффекта и все его закономерности хорошо объясняются с помощью квантовой теории света, что подтверждает квантовую природу света.

Эйнштейн (1905 г.), развивая квантовую теорию Планка, выдвинул идею, согласно которой не только излучение и поглощение, но и распространение света происходит порциями (квантами), энергия и импульс которых:

$$\begin{aligned} E_0 &= h\nu \\ \vec{p} &= \frac{h\nu}{c} \vec{k} \end{aligned} \quad (344)$$

где $\vec{k}$ – единичный вектор, направленный по волновому вектору. Применяя к явлению фотоэффекта в металлах закон сохранения энергии, Эйнштейн предложил следующую формулу:

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2} \quad (345)$$

где A – работа выхода электрона из металла, v – скорость фотоэлектрона. Согласно Эйнштейну, каждый квант поглощается только одним электроном, причем часть энергии падающего фотона тратится на совершение работы выхода электрона металла, оставшаяся же часть сообщает электрону кинетическую энергию $\frac{mv^2}{2}$.

Как следует из уравнения Эйнштейна, фотоэффект в металлах может возникнуть только при $h\nu \geq A$, в противном случае энергия фотона будет недостаточной для вырывания электрона из металла. Наименьшая частота света $\nu_{\min}$, под действием которого происходит фотоэффект, определяется, очевидно, из условия

$$h\nu_{\text{мин}} = A, \quad (346)$$

откуда

$$\nu_{\text{мин}} = \frac{A}{h} \quad (347)$$

Частота света, определяемая условием $\nu_{\text{мин}} = \frac{A}{h}$, называется «красной границей» фотоэффекта. Слово «красная» не имеет никакого отношения к цвету света, при котором происходит фотоэффект.

В зависимости от рода металлов «красная граница» фотоэффекта может соответствовать красному, желтому, фиолетовому, ультрафиолетовому свету и т. д.

С помощью формулы Эйнштейна можно объяснить и другие закономерности фотоэффекта.

Положим, что $U_A - U_K < 0$, т. е. между анодом и катодом существует тормозящий потенциал. Если кинетическая энергия электронов достаточна, то они, преодолев тормозящее поле, создают фототок. В фототоке участвуют те электроны, для которых удовлетворяется условие $\frac{mv_{\text{макс}}^2}{2} > eU_3$. Величина задерживающего потенциала определяется из условия $eU_3 = \frac{mv^2}{2}$, где v — максимальная скорость вырванных электронов. Подставив $\frac{mv_{\text{макс}}^2}{2} > eU_3$ в уравнения Эйнштейна, получим

$$U_3 = \frac{h}{e}\nu - \frac{A}{e} \quad (348)$$

Таким образом, величина задерживающего потенциала не зависит от интенсивности, а зависит только от частоты падающего света.

Работу выхода электронов из металла и постоянную Планка можно определить, построив график зависимости U_3 от частоты падающего света (см. рисунок 127). Как видно из рисунка 127, $\text{tg } \alpha = \frac{h}{e}$ и отрезок, отсекаемый от оси потенциала, дает $\frac{A}{e}$.

Ввиду того, что интенсивность света прямо пропорциональна количеству фотонов, увеличение интенсивности падающего света приводит к увеличению числа вырванных электронов, т. е. к увеличению фототока.

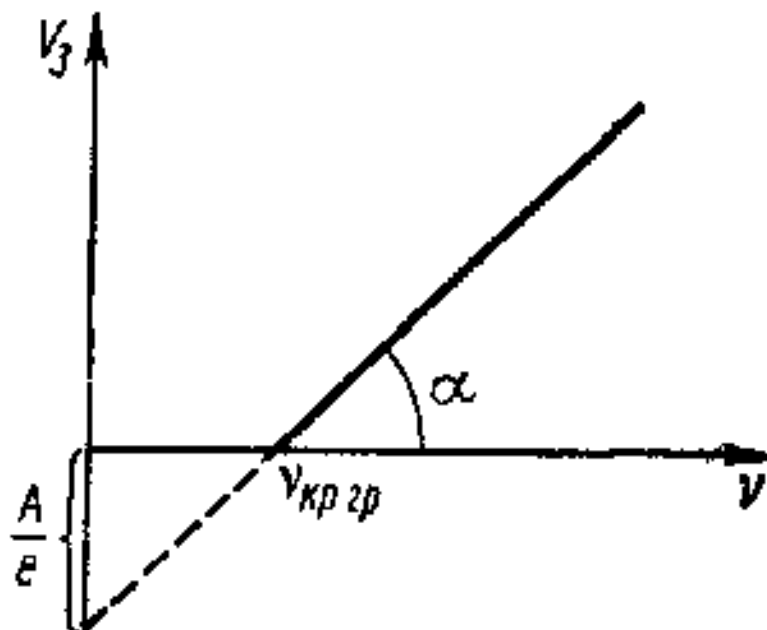


Рисунок 127 - Графическое определение постоянной Планка и работы выхода

Формула Эйнштейна для фотоэффекта в неметаллах имеет вид

$$h\nu = A + A_1 + \frac{mv^2}{2} \quad (349)$$

Наличие A_1 - работы отрыва связанного электрона от атома внутри неметаллов - объясняется тем, что в отличие от металлов, где имеются свободные электроны, в неметаллах электроны находятся в связанном с атомами состоянии. Очевидно, при падении света на неметаллы часть световой энергии тратится на фотоэффект в атоме - на отрыв электрона от атома, а оставшаяся часть тратится на работу выхода электрона и сообщение электрону кинетической энергии.

В отличие от металлов в полупроводниках и диэлектриках также возникает так называемый внутренний фотоэффект, состоящий в возбуждении электронов из валентной зоны в зону проводимости. Для внутреннего фотоэффекта энергия поглощенного светового кванта не должна быть меньше ширины запрещенной зоны (разность энергии между нижней границей зоны проводимости и верхней границей валентной зоны).

Смещение «красной границы» фотоэффекта

Выше излагалась суть теории Эйнштейна и ее экспериментальное подтверждение в рамках линейной оптики — при слабых световых полях. Подобный фотоэффект можно называть однофотонным.

Если в качестве источника света пользоваться мощными лазерными источниками, то возникает многофотонное поглощение, а, следовательно, многофотонный фотоэффект. Под действием светового поля напряженностью 10^7 В/см удалось надежно регистрировать шести- и семифотонную ионизацию инертных газов.

Двухфотонный внутренний фотоэффект в полупроводнике наблюдался еще в 1964 г. в CdS при использовании рубинового лазера.

Отметим, что энергия фотонов нелазерных излучений с той же частотой, что у излучения рубинового лазера (1,8 эВ), явно недостаточна для осуществления внутреннего фотоэффекта в CdS, ширина зоны у которого 2,4 эВ. Единственной причиной возникновения внутреннего фотоэффекта под действием мощного лазерного излучения явилось поглощение более одного фотона в каждом акте.

Многофотонный фотоэффект приводит к исчезновению «красной границы» фотоэффекта, определяемой формулой $\nu_{\text{мин}} = \frac{A}{h}$, и ее смещению в длинноволновую часть шкалы электромагнитных волн. Это вполне понятно, так как при многофотонном, например n-фотонном, фотоэффекте в левой части уравнения Эйнштейна будет присутствовать энергия не одного, а n квантов. В частности, если энергии всех поглощенных квантов равны, то для n-фотонного фотоэффекта условие $h\nu_{\text{мин}} = A$ будет иметь вид

$$nh\nu'_{\text{мин}} = A \quad (350)$$

где $h\nu'_{\text{мин}}$ — энергия одного фотона. Тогда $\nu'_{\text{мин}} = \frac{A}{nh} = \frac{h\nu_{\text{мин}}}{hn} = \frac{\nu_{\text{мин}}}{n}$, т. е. «красная граница», выраженная в частотах, в этом случае станет в n раз меньше по сравнению с однофотонным фотоэффектом.

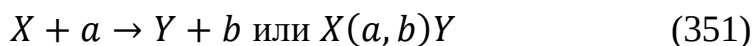
Внутренний фотоэффект, или фотопроводимость, — это явление возникновения внутри полупроводника избыточных носителей тока под действием освещения. В простейшем случае собственного полупроводника излучение возбуждает валентные электроны в зоне проводимости, где они находятся в свободном состоянии и могут участвовать в процессе переноса заряда. Вклад в проводимость дают также возникающие в валентной зоне дырки. В примесном полупроводнике n-типа кроме собственного фотоэффекта возможно еще возбуждение электронов из связанных состояний на донорных центрах в зону проводимости. Аналогичным образом в полупроводниках p-типа возможно возбуждение электронов из валентной зоны на акцепторные уровни, создавая тем самым подвижные дырки. Характерно, что в обоих случаях примесной фотопроводимости в кристалле генерируются свободные носители только одного знака. Так же, как и внешний фотоэффект, фотопроводимость проявляется в однородном материале в присутствии внешнего электрического поля.

Вентильный фотоэффект — это явление возникновения э. д. с. при освещении контакта двух разных полупроводников или полупроводника и металла в отсутствие внешнего электрического поля. На этом явлении основаны вентильные фотоэлементы, обладающие тем преимуществом перед фотосопротивлениями и внешними фотоэлементами, что они могут служить индикаторами лучевой энергии, не требующими внешнего питания. Но главная особенность вентильных фотоэлементов состоит в том, что они открывают путь для прямого превращения солнечной энергии в электрическую. В начале

нашего века существовали фотоэлементы, работающие на контактах полупроводников и металлов. Однако в дальнейшем было показано, что наиболее эффективными являются фотоэлементы, основанные на использовании контакта двух полупроводников с р- и п-типами проводимости, т. е. на так называемом р-п-переходе. При освещении перехода в р-области образуются электронно-дырочные пары. Электроны и дырки диффундируют к р-п-переходу. Электроны под действием контактного поля будут переходить в п-область. Дырки же преодолевать барьер не могут и остаются в р-области. В результате р-область заряжается положительно, п-область — отрицательно и в р-п-переходе возникает дополнительная разность потенциалов. Ее и называют фотоэлектродвижущей силой (фото-э.д.с.). Наиболее эффективными преобразователями солнечной энергии сегодня являются кремниевые фотоэлементы.

2.5.2 Ядерные реакции

Ядерные реакции — это превращения атомных ядер при взаимодействии с элементарными частицами (в том числе и с γ -квантами) или друг с другом. Наиболее распространенным видом ядерной реакции является реакция, записываемая символически следующим образом:



где X и Y — исходное и конечное ядра, a и b — бомбардирующая и испускаемая (или испускаемые) в ядерной реакции частицы.

В ядерной физике эффективность взаимодействия характеризуют эффективным сечением σ . С каждым видом взаимодействия частицы с ядром связывают свое эффективное сечение: эффективное сечение рассеяния определяет процессы рассеяния, эффективное сечение поглощения — процессы поглощения. Эффективное сечение ядерной реакции

$$\sigma = \frac{dN}{nNdx} \quad (352)$$

где N — число частиц, падающих за единицу времени на единицу площади поперечного сечения вещества, имеющего в единице объема n ядер, dN — число этих частиц, вступающих в ядерную реакцию в слое толщиной dx . Эффективное сечение σ имеет размерность площади и характеризует вероятность того, что при падении пучка частиц на вещество произойдет реакция.

Единица эффективного сечения ядерных процессов — барн ($1 \text{ барн} = 10^{-28} \text{ м}^2$). В любой ядерной реакции выполняются законы сохранения электрических зарядов и массовых чисел: сумма зарядов (и сумма массовых чисел) ядер и частиц, вступающих в ядерную реакцию, равна сумме зарядов (и сумме

массовых чисел) конечных продуктов (ядер и частиц) реакции. Выполняются также законы сохранения энергии, импульса и момента импульса.

В отличие от радиоактивного распада, который протекает всегда с выделением энергии, ядерные реакции могут быть как экзотермическими (с выделением энергии), так и эндотермическими (с поглощением энергии).

Важную роль в объяснении механизма многих ядерных реакций сыграло предположение Н. Бора (1936) о том, что ядерные реакции протекают в две стадии по следующей схеме:



Первая стадия — это захват ядром X частицы a , приблизившейся к нему на расстояние действия ядерных сил (примерно $2 \cdot 10^{-15}$ м), и образование промежуточного ядра C , называемого составным (или компаунд-ядром). Энергия влетевшей в ядро частицы быстро распределяется между нуклонами составного ядра, в результате чего оно оказывается в возбужденном состоянии. При столкновении нуклонов составного ядра один из нуклонов (или их комбинация, например дейтрон — ядро тяжелого изотопа водорода — дейтерия, содержащее один протон и один нейтрон) или α -частица может получить энергию, достаточную для вылета из ядра. В результате возможна вторая стадия ядерной реакции — распад составного ядра на ядро Y и частицу b .

В ядерной физике вводится характерное ядерное время — время, необходимое для пролета частицей расстояния порядка величины, равной диаметру ядра ($d \approx 10^{-15}$ м). Так, для частицы с энергией 1 МэВ (что соответствует ее скорости $v \approx 10^7$ м/с) характерное ядерное время $\tau = 10^{-15} \text{ м} / 10^7 \text{ м/с} = 10^{-22}$ с. С другой стороны, доказано, что время жизни составного ядра равно $10^{-16} \text{—} 10^{-12}$ с, т. е. составляет $(10^6 \text{—} 10^{10})$ т. Это же означает, что за время жизни составного ядра может произойти очень много столкновений нуклонов между собой, т. е. перераспределение энергии между нуклонами действительно возможно. Следовательно, составное ядро живет настолько долго, что полностью «забывает», каким образом оно образовалось. Поэтому характер распада составного ядра (испускание им частицы b) — вторая стадия ядерной реакции — не зависит от способа образования составного ядра — первой стадии.

Если испущенная частица тождественна с захваченной ($b \equiv a$), то схема (189) описывает рассеяние частицы: упругое — при $E_b = E_a$, неупругое — при $E_b \neq E_a$. Если же испущенная частица не тождественна с захваченной ($b \neq a$), то имеем дело с ядерной реакцией в прямом смысле слова.

Некоторые реакции протекают без образования составного ядра, они называются прямыми ядерными взаимодействиями (например, реакции, вызываемые быстрыми нуклонами и дейтронами).

Ядерные реакции классифицируются по следующим признакам:

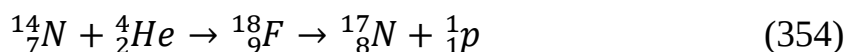
1) по роду участвующих в них частиц — реакции под действием нейтронов; реакции под действием заряженных частиц (например, протонов, дейтронов, α -частиц); реакции под действием γ -квантов;

2) по энергии вызывающих их частиц — реакции при малых энергиях (порядка электрон-вольт), происходящие в основном с участием нейтронов; реакции при средних энергиях (до нескольких мегаэлектрон-вольт), происходящие с участием γ -квантов и заряженных частиц (протоны, α -частицы); реакции при высоких энергиях (сотни и тысячи мегаэлектрон-вольт), приводящие к рождению отсутствующих в свободном состоянии элементарных частиц и имеющие большое значение для их изучения;

3) по роду участвующих в них ядер — реакции на легких ядрах ($A < 50$); реакции на средних ядрах ($50 < A < 100$); реакции на тяжелых ядрах ($A > 100$);

4) по характеру происходящих ядерных превращений — реакции с испусканием нейтронов; реакции с испусканием заряженных частиц; реакции захвата (в этих реакциях составное ядро не испускает никаких частиц, а переходит в основное состояние, излучая один или несколько γ -квантов).

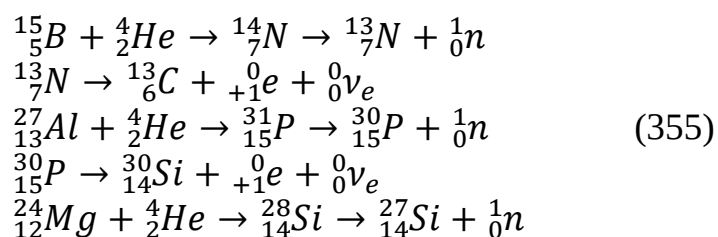
Первая в истории ядерная реакция осуществлена Э. Резерфордом (1919) при бомбардировке ядра азота α -частицами, испускаемыми радиоактивным источником:



П. Дираком было получено (1928) релятивистское волновое уравнение для электрона, которое позволило объяснить все основные свойства электрона, в том числе наличие у него спина и магнитного момента. Замечательной особенностью уравнения Дирака оказалось то, что из него для полной энергии свободного электрона получались не только положительные, но и отрицательные значения. Этот результат мог быть объяснен лишь предположением о существовании античастицы электрона — позитрона.

Гипотеза Дирака, недоверчиво воспринимавшаяся большинством физиков, была блестяще подтверждена в 1932 г. К. Андерсеном, обнаружившим позитрон в составе космического излучения. Существование позитронов было доказано наблюдением их треков в камере Вильсона, помещенной в магнитном поле. Эти частицы в камере отклонялись так, как отклоняется движущийся положительный заряд. Опыты показали, что позитрон ${}^0_{+1}\text{e}$ — частица с массой покоя, в точности равной массе покоя электрона, и спином $\frac{1}{2}$ (в единицах $\hbar$), несущая положительный электрический заряд $+e$.

Фредерик и Ирен Жолио-Кюри бомбардируя различные ядра α -частицами, обнаружили искусственно-радиоактивные ядра, испытывающие β^- -распад, а реакции на В, Al и Mg привели к искусственно-радиоактивным ядрам, претерпевающим β^+ -распад, или позитронный распад:



Наличие в этих реакциях позитронов доказано при изучении их треков в камере Вильсона, помещенной в магнитное поле.

Таким образом, в экспериментах Жолио-Кюри, с одной стороны, открыта искусственная радиоактивность, а с другой — впервые обнаружен позитронный радиоактивный распад.

Энергетический β^+ -спектр, как и β^- -спектр, непрерывен. β^+ -Распад подчиняется следующему правилу смещения:



Процесс β^+ -распада протекает так, как если бы один из протонов ядра превратился в нейтрон, испустив при этом позитрон и нейтрино:



причем одновременный выброс нейтрино вытекает из тех же соображений, которые излагались при обсуждении β^- -распада. Так как масса покоя протона меньше, чем у нейтрона, то реакция (193) для свободного протона наблюдаться не может. Однако для протона, связанного в ядре благодаря ядерному взаимодействию частиц, эта реакция оказывается энергетически возможной.

Вскоре после опытов К. Андерсена, а также обоснования β^+ -распада было установлено, что позитроны могут рождаться при взаимодействии γ -квантов большой энергии ($E_\gamma > 1,02 \text{ МэВ} = 2m_e c^2$) с веществом. Этот процесс идет по схеме



Электронно-позитронные пары были действительно обнаружены в помещенной в магнитное поле камере Вильсона, в которой электрон и позитрон, имеющие противоположные по знаку заряды, отклонялись в противоположные стороны.

Для выполнения соотношения (193) помимо выполнения законов сохранения энергии и импульса необходимо, чтобы фотон обладал целым спином, равным 0 или 1, поскольку спины электрона и позитрона равны $\frac{1}{2}$. Ряд экспериментов и теоретических выкладок привели к выводу, что спин фотона действительно равен 1 (в единицах $\hbar$).

При столкновении позитрона с электроном происходит их аннигиляция:

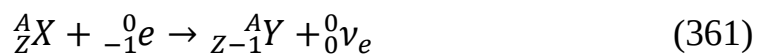


В ее процессе электронно-позитронная пара превращается в два γ -кванта, причем энергия пары переходит в энергию фотонов. Появление в этом процессе двух γ -квантов следует из закона сохранения импульса и энергии. Реакция (195) подтверждена прямыми экспериментами под руководством советского ученого Л. А. Арцимовича. Процессы (194) и (195) — процессы возникновения и превращения электронно-позитронных пар — являются примером взаимосвязи различных форм материи: в этих процессах материя в форме вещества превращается в материю в форме электромагнитного поля, и наоборот.

Для многих ядер превращение протона в нейтрон, помимо описанного процесса (193), происходит посредством электронного захвата, или е-захвата, при котором ядро спонтанно захватывает электрон с одной из внутренних оболочек атома (K, L и т. д.), испуская нейтрино:



Необходимость появления нейтрино вытекает из закона сохранения спина. Схема е-захвата:



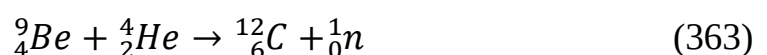
т. е. один из протонов ядра превращается в нейтрон, заряд ядра убывает на единицу и оно смещается влево так же, как и при позитронном распаде.

Электронный захват обнаруживается по сопровождающему его характеристическому рентгеновскому излучению, возникающему при заполнении образовавшихся вакансий в электронной оболочке атома (именно так е-захват и был открыт в 1937 г.). При е-захвате, кроме нейтрино, никакие другие частицы не вылетают, т. е. вся энергия распада уносится нейтрино. В этом е-захват (часто его называют третьим видом β -распада) существенно отличается от $\beta^\pm$ -распадов, при которых вылетают две частицы, между которыми и распределяется энергия распада. Примером электронного захвата может служить превращение радиоактивного ядра бериллия ${}^7_4\text{Be}$ в стабильное ядро ${}^7_3\text{Li}$:



В 1932 году Чедвиком была открыта элементарная частица, названная нейтроном. Нейтроны, являясь электрически нейтральными частицами, не испытывают кулоновского отталкивания и поэтому легко проникают в ядра и вызывают разнообразные ядерные превращения. Изучение ядерных реакций под действием нейтронов не только сыграло огромную роль в развитии ядерной физики, но и привело к появлению ядерных реакторов.

Нейтроны были обнаружены в следующей ядерной реакции:



Эта реакция не является единственной, ведущей к выбрасыванию из ядер нейтронов (например, нейтроны возникают в реакциях ${}^7_3\text{Li} (\alpha, n) {}^{10}_5\text{B}$ и ${}^{11}_5\text{B} (\alpha, n) {}^{14}_7\text{N}$).

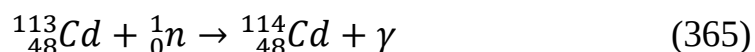
Характер ядерных реакций под действием нейтронов зависят от их скорости (энергии). В зависимости от энергии нейтроны условно делят на две группы: медленные и быстрые. Область энергий медленных нейтронов включает в себя область ультрахолодных (с энергией до 10^{-7} эВ), очень холодных ($10^{-7} — 10^{-4}$ эВ), холодных ($10^{-4} — 10^{-3}$ эВ), тепловых ($10^{-3} — 0,5$ эВ) и резонансных ($0,5 — 10^4$ эВ) нейтронов. Ко второй группе можно отнести быстрые ($10^4 — 10^8$ эВ), высокоэнергетичные ($10^8 — 10^{10}$ эВ) и релятивистские ($\geq 10^{10}$ эВ) нейтроны.

Замедлить нейтроны можно пропуская их через какое-либо вещество, содержащее водород (например, парафин, вода). Проходя через такие вещества, быстрые нейтроны испытывают рассеяние на ядрах и замедляются до тех пор, пока их энергия не станет равной, например, энергии теплового движения атомов вещества замедлителя, т. е. равной приблизительно кТ.

Медленные нейтроны эффективны для возбуждения ядерных реакций, так как они относительно долго находятся вблизи атомного ядра. Благодаря этому вероятность захвата нейтрона ядром становится довольно большой. Однако энергия медленных нейтронов мала, потому они не могут вызывать, например, неупругое рассеяние. Для медленных нейтронов характерны упругое рассеяние на ядрах (реакция типа (п, п)) и радиационный захват (реакция типа (п, γ)). Реакция (п, γ) приводит к образованию нового изотопа исходного вещества:



Например,



Часто в результате (п, γ)-реакции образуются искусственные радиоактивные изотопы, дающие, как правило, β^- -распад. Например, в результате реакции



образуется радиоактивный изотоп ${}^{32}_{15}\text{P}$, претерпевающий β^- -распад с образованием стабильного изотопа серы:



Под действием медленных нейтронов на некоторых легких ядрах наблюдаются также реакции захвата нейтронов с испусканием заряженных частиц—протонов и α -частиц (под действием тепловых нейтронов):



(используется для обнаружения нейтронов) или



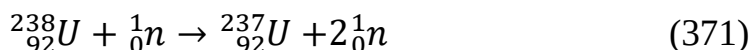
Реакции типа (n, p), т. е. реакции с образованием заряженных частиц, происходят в основном под действием быстрых нейтронов, так как в случае медленных нейтронов энергии атомного ядра недостаточно для преодоления потенциального барьера, препятствующего вылету протонов и α -частиц. Эти реакции, как и реакции радиационного захвата, часто ведут к образованию β^- -активных ядер.

Для быстрых нейтронов наблюдается неупругое их рассеяние, совершающееся по схеме



где вылетающий из ядра нейтрон обозначен как ${}_0^1\text{n}'$, поскольку это не тот нейтрон, который проник в ядро; ${}_0^1\text{n}'$ имеет энергию, меньшую энергии ${}_0^1\text{n}$, а остающееся после вылета нейтрона ядро находится в возбужденном состоянии (отмечено звездочкой), поэтому его переход в нормальное состояние сопровождается испусканием γ -кванта.

Когда энергия нейтронов достигает значений 10 МэВ, становятся возможными реакции типа (n, 2n). Например, в результате реакции



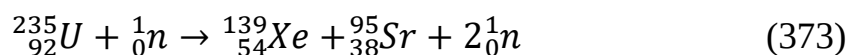
образуется β^- -активный изотоп ${}^{237}_{92}\text{U}$, претерпевающий распад по схеме



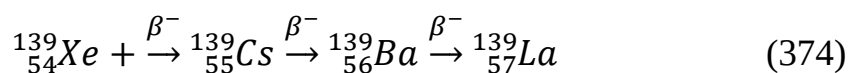
К началу 40-х годов 20 века работами многих ученых было доказано, что при облучении урана нейтронами образуются элементы из середины Периодической системы — лантан и барий. Этот результат положил начало ядерным реакциям совершенно нового типа — реакциям деления ядра,

закрывающимся в том, что тяжелое ядро под действием нейтронов, а как впоследствии оказалось и других частиц делится на несколько более легких ядер (осколков), чаще всего на два ядра, близких по массе.

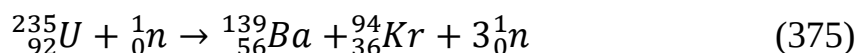
Замечательной особенностью деления ядер является то, что оно сопровождается испусканием двух-трех вторичных нейтронов, называемых нейтронами деления. Так как для средних ядер число нейтронов примерно равно числу протонов ($N/Z \approx 1$), а для тяжелых ядер число нейтронов значительно превышает число протонов ($N/Z \approx 1,6$), то образовавшиеся осколки деления перегружены нейтронами, в результате чего они и выделяют нейтроны деления. Однако испускание нейтронов деления не устраняет полностью перегрузку ядер-осколков нейтронами. Это приводит к тому, что осколки оказываются радиоактивными. Они могут претерпеть ряд β^- -превращений, сопровождаемых испусканием γ -квантов. Так как β^- -распад сопровождается превращением нейтрона в протон, то после цепочки β^- -превращений соотношение между нейтронами и протонами в осколке достигнет величины, соответствующей стабильному изотопу. Например, при делении ядра урана ${}^{235}_{92}\text{U}$



осколок деления ${}^{139}_{54}\text{Xe}$ в результате трех актов β^- -распада превращается в стабильный изотоп лантана ${}^{139}_{57}\text{La}$:



Осколки деления могут быть разнообразными, поэтому реакция (209) не единственная приводящая к делению ${}^{235}_{92}\text{U}$. Возможна, например, реакция



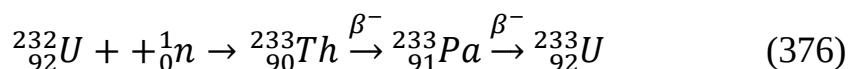
Большинство нейтронов при делении испускается практически мгновенно ($t \leq 10^{-14}$ с), а часть (около 0,7%) испускается осколками деления спустя некоторое время после деления ($0,05 \text{ с} \leq t \leq 60 \text{ с}$). Первые из них называются мгновенными, вторые — запаздывающими. В среднем на каждый акт деления приходится 2,5 испущенных нейтронов. Они имеют сравнительно широкий энергетический спектр в пределах от 0 до 7 МэВ, причем на один нейтрон в среднем приходится энергия около 2 МэВ.

Расчеты показывают, что деление ядер должно сопровождаться также выделением большого количества энергии. В самом деле, удельная энергия связи для ядер средней массы составляет примерно 8,7 МэВ, в то время как для тяжелых ядер она равна 7,6 МэВ. Следовательно, при делении тяжелого ядра на два осколка должна освобождаться энергия, равная примерно 1,1 МэВ на один нуклон.

Эксперименты подтверждают, что при каждом акте деления действительно выделяется огромная энергия, которая распределяется между осколками (основная доля), нейтронами деления, а также между продуктами последующего распада осколков деления.

В основу теории деления атомных ядер положена капельная модель ядра. Ядро рассматривается как капля электрически заряженной несжимаемой жидкости (с плотностью, равной ядерной, в подчиняющейся законам квантовой механики), частицы которой при попадании нейтрона в ядро приходят в колебательное движение, в результате чего ядро разрывается на две части, разлетающиеся с огромной энергией.

Вероятность деления ядер определяется энергией нейтронов. Например, если высокоэнергетичные нейтроны вызывают деление практически всех ядер, то нейтроны с энергией в несколько мегаэлектрон-вольт — только тяжелых ядер ($A > 210$). Нейтроны, обладающие энергией активации (минимальной энергией, необходимой для осуществления реакции деления ядра) порядка 1 МэВ, вызывают деление ядер урана ${}^{238}_{92}\text{U}$, тория ${}^{232}_{90}\text{Th}$, протактиния ${}^{231}_{91}\text{Pa}$ и плутония ${}^{239}_{94}\text{Pu}$. Тепловыми нейтронами делятся ядра ${}^{235}_{92}\text{U}$, ${}^{239}_{94}\text{Pu}$ и ${}^{233}_{92}\text{U}$, ${}^{230}_{90}\text{Th}$ (два последних изотопа в природе не встречаются, они получают искусственным путем). Например, изотоп ${}^{233}_{92}\text{U}$ получается в результате радиационного захвата (реакции (n, γ)) нейтронов ядром ${}^{232}_{90}\text{Th}$:



Испускаемые при делении ядер вторичные нейтроны могут вызвать новые акты деления, что делает возможным осуществление цепной реакции деления — ядерной реакции, в которой частицы, вызывающие реакцию, образуются как продукты этой реакции. Цепная реакция деления характеризуется коэффициентом размножения k нейтронов, который равен отношению числа нейтронов в данном поколении к их числу в предыдущем поколении. Необходимым условием для развития цепной реакции деления является требование $k \geq 1$.

Оказывается, что не все образующиеся вторичные нейтроны вызывают последующее деление ядер, что приводит к уменьшению коэффициента размножения. Во-первых, из-за конечных размеров активной зоны (пространство, где происходит цепная реакция) и большой проникающей способности нейтронов часть из них покинет активную зону раньше, чем будет захвачена каким-либо ядром. Во-вторых, часть нейтронов захватывается ядрами неделящихся примесей, всегда присутствующих в активной зоне. Кроме того, наряду с делением могут иметь место конкурирующие процессы радиационного захвата и неупругого рассеяния.

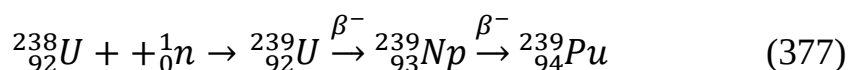
Коэффициент размножения зависит от природы делящегося вещества, а для данного изотопа — от его количества, а также размеров и формы активной зоны. Минимальные размеры активной зоны, при которых возможно

осуществление цепной реакции, называются критическими размерами. Минимальная масса делящегося вещества, находящегося в системе критических размеров, необходимая для осуществления цепной реакции, называется критической массой.

Скорость развития цепных реакций различна. При $k > 1$ идет развивающаяся реакция, число делений непрерывно растет и реакция может стать взрывной. При $k = 1$ идет самоподдерживающаяся реакция, при которой число нейтронов с течением времени не изменяется. При $k < 1$ идет затухающая реакция.

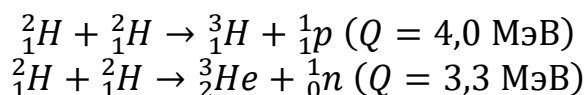
Цепные реакции делятся на управляемые и неуправляемые. Взрыв атомной бомбы, например, является неуправляемой реакцией. Чтобы атомная бомба при хранении не взорвалась, в ней $^{235}_{92}\text{U}$ (или $^{239}_{94}\text{Pu}$) делится на две удаленные друг от друга части с массами ниже критических. Затем с помощью обычного взрыва эти массы сближаются, общая масса делящегося вещества становится больше критической и возникает взрывная цепная реакция, сопровождающаяся мгновенным выделением огромного количества энергии и большими разрушениями. Взрывная реакция начинается за счет имеющихся нейтронов спонтанного деления или нейтронов космического излучения. Управляемые цепные реакции осуществляются в ядерных реакторах.

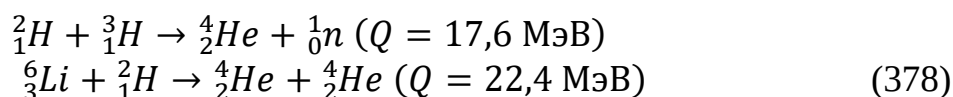
В природе имеется три изотопа, которые могут служить ядерным топливом ($^{235}_{92}\text{U}$: в естественном уране его содержится примерно 0,7%) или сырьем для его получения ($^{232}_{90}\text{Th}$ и $^{238}_{92}\text{U}$: в естественном уране его содержится примерно 99,3%). $^{232}_{90}\text{Th}$ служит исходным продуктом для получения искусственного ядерного топлива $^{233}_{92}\text{U}$ (см. реакцию (212)), а $^{238}_{92}\text{U}$, поглощая нейтроны, посредством двух последовательных β^- -распадов — для превращения в ядро $^{239}_{94}\text{Pu}$:



Реакции (213) и (212), таким образом, открывают реальную возможность воспроизводства ядерного горючего в процессе цепной реакции деления.

Источником огромной энергии может служить реакция синтеза атомных ядер — образование из легких ядер более тяжелых. Удельная энергия связи ядер резко увеличивается при переходе от ядер тяжелого водорода (дейтерия ^2_1H и трития ^3_1H) к литию ^6_3Li и особенно к гелию ^4_2He , т. е. реакции синтеза легких ядер в более тяжелые должны сопровождаться выделением большого количества энергии, что действительно подтверждается расчетами. В качестве примеров рассмотрим реакции синтеза:





где Q — энергосодержание.

Реакции синтеза атомных ядер обладают той особенностью, что в них энергия, выделяемая на один нуклон, значительно больше, чем в реакциях деления тяжелых ядер. В самом деле, если при делении ядра ${}^{238}_{92}\text{U}$ выделяется энергия примерно 200 МэВ, что составляет на один нуклон примерно 0,84 МэВ, то в реакции (214) эта величина равна $17,6/5 \text{ МэВ} \approx 3,5 \text{ МэВ}$.

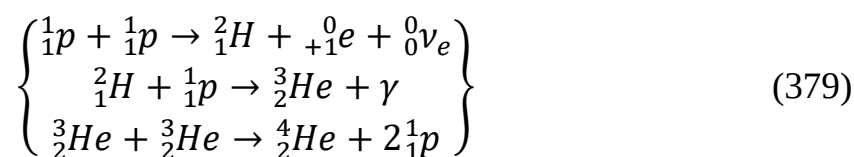
Реакция синтеза ядер дейтерия может происходить лишь при температуре, на два порядка превышающей температуру центральных областей Солнца (примерно $1,3 \cdot 10^7 \text{ К}$).

Однако оказывается, что для протекания реакции синтеза атомных ядер достаточно температуры порядка 10^7 К . Это связано с двумя факторами: 1) при температурах, характерных для реакций синтеза атомных ядер, любое вещество находится в состоянии плазмы, распределение частиц которой подчиняется закону Максвелла; поэтому всегда имеется некоторое число ядер, энергия которых значительно превышает среднее значение; 2) синтез ядер может происходить вследствие туннельного эффекта.

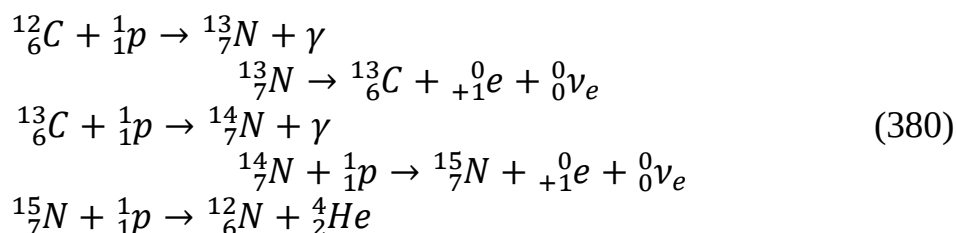
Реакции синтеза легких атомных ядер в более тяжелые, происходящие при сверхвысоких температурах (примерно 10^7 К и выше), называются термоядерными реакциями.

Термоядерные реакции являются, по-видимому, одним из источников энергии Солнца и звезд. В принципе высказаны два предположения о возможных способах протекания термоядерных реакций на Солнце:

1) протонно-протонный, или водородный, цикл, характерный для температур (примерно 10^7 К):



2) углеродно-азотный, или углеродный, цикл, характерный для более высоких температур (примерно $2 \cdot 10^7 \text{ К}$):



В результате этого цикла четыре протона превращаются в ядро гелия и выделяется энергия, равная 26,7 МэВ. Ядра же углерода, число которых остается неизменным, участвуют в реакции в роли катализатора.

Термоядерные реакции дают наибольший выход энергии на единицу массы «горючего», чем любые другие превращения, в том числе и деление тяжелых ядер. Например, количество дейтерия в стакане простой воды энергетически эквивалентно примерно 60 л бензина. Поэтому заманчива перспектива осуществления термоядерных реакций искусственным путем.

Впервые искусственная термоядерная реакция осуществлена в Советском Союзе (1953), а затем (через полгода) в США в виде взрыва водородной (термоядерной) бомбы, являющегося неуправляемой реакцией. Взрывчатым веществом служила смесь дейтерия и трития, а запалом — «обычная» атомная бомба, при взрыве которой возникает необходимая для протекания термоядерной реакции температура.

Заключение

В данном учебно-методическом пособии были рассмотрены некоторые вопросы, касающиеся применения теоретических знаний к выполнению практических, лабораторных и лабораторно-практических работ по отдельным темам курса общей физики, выполняемых при помощи соответствующего программного обеспечения – виртуальных лабораторных. Также в пособии достаточно подробно приведены выводы основных формул механики, молекулярной физики и электромагнетизма, оптики, что позволит студентам с недостаточной математической подготовкой при наличии некоторых усилий понять основной математический аппарат теории. Это позволит усваивать материал более глубоко и осознанно. Основная цель пособия в том, чтобы помочь студентам изучить, углубить, расширить и закрепить знания по отдельным темам курса общей физики, научиться применять полученные знания для решения практических задач, научиться делать выводы на основе наблюдаемых явлений и процессов.

Список использованных источников

- 1 Гришина Э., Велюк И. Физика в таблицах и схемах. М.: Феникс, 2016
- 2 Гришина Э., Велюк И. Памятка по физике. М.: Феникс, 2016
- 3 Иванов И. Физика. Механика. М.: Айрис-Пресс, 2013
- 4 Калашников С.Г. Электричество. М.: Наука, 1977
- 5 Касаткина И. Физика. Пособие-репетитор. Магнетизм. Колебания и волны. Оптика. Элементы теории относительности. Физика атомов. М.: Феникс, 2016
- 6 Кикоин И. К., Кикоин Л. К. Молекулярная физика. М.: ГИФМ, 1983.
- 7 «Открытая физика 2.5 часть 1» ООО «Физикон», 2002
- 8 «Открытая физика 2.5 часть 2» ООО «Физикон», 2002
- 9 Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 1- Механика. Молекулярная физика. М.: Наука, Физматлит, 1998.
- 10 Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 2- Электричество. М.: Наука, Физматлит, 1998.
- 11 Савельев И.В. Курс общей физики. Т. 3- Оптика. Квантовая физика. М.: Наука, Физматлит, 1998.
- 12 Сивухин Л.В. Общий курс физики. Т. 1- Механика. М.: Наука, 1977-1986
- 13 Сивухин Л.В. Общий курс физики. Т. 2 – Молекулярная физика и термодинамика. М.: Наука, 1977-1986
- 14 Сивухин Л.В. Общий курс физики. Т. 3- Электричество. М.: Наука, 1977-1986
- 15 Сивухин Л.В. Общий курс физики. Т. 4 - Оптика. М.: Наука, 1977-1986
- 16 Сивухин Л.В. Общий курс физики. Т. 5 в 2х частях. Ч.1 – Атомная физика. М.: Наука, 1977-1986
- 17 Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высшая школа, 2001
- 18 Фейнман. Р., Сэнде М. Фейнмановские лекции по физике. Задачи и упражнения с ответами и решениями. Учебное пособие. М.: Либроком, 2016

Приложение А
Примерный образец оформления титульного листа

Костанайский государственный университет

Инженерно-технический факультет

Кафедра электроэнергетики и физики

Отчёт по практической работе №3

*Силы трения на примере тела, находящегося на наклонной
плоскости*

	<i>Дата</i>	<i>Подпись</i>	<i>Баллы (%)</i>
<i>Допуск</i>	11.03.16	Дунский	17
<i>Расчёты</i>	11.03.16	Дунский	20
<i>Д/з</i>	21.03.16	Дунский	20
<i>Защита</i>	21.03.16	Дунский	31
<i>Итого</i>			88

Выполнил: Иванов А.А.

Проверил: Дунский М.М.

Выделенные поля таблицы заполняются преподавателем!

Приложение Б

Примерный алгоритм выполнения работы

Цель работы:

Кратко в 3-4 предложениях сформулировать цель выполнения работы

Расчётные формулы:

Выписать несколько основных формул, подписать входящие величины

Схема, рисунок, чертёж

Выбрать и выполнить один поясняющий рисунок к работе

Таблица

*(если несколько, то Таблица1, под ней сразу же Таблица2 и т.д.
Если таблицы нет, то составить её самостоятельно)*

Расчеты

Привести в бланке все выполняемые расчеты

Сделать вывод по работе

Ответить на вопросы выходного контроля