

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Псковский государственный университет»**

Институт математического моделирования и игропрактики

Кафедра физики

Направление 44.03.05 Педагогическое образование
(с двумя профилями подготовки)

профили «Информатика и физика»

«ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ»

Заведующий кафедрой

ЗАЩИЩЕНА С ОЦЕНКОЙ

_____ /Ганго С.Е./

« _____ »

« _____ » _____ 20____ г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

Сарухановой Виктории Львовны

на тему

**УЧЕБНЫЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ЯВЛЕНИЯ
РАССЕЯНИЯ СВЕТА**

Руководитель

Кандидат физико-математических наук, доцент _____ /Иванова М.С./

Автор работы

_____ /Саруханова В.Л./

Псков
2020

Содержание

Введение.....	4
Глава 1. Учебный физический эксперимент	6
1.1. Учебный физический эксперимент и его виды.....	6
1.2. Демонстрационный эксперимент	7
1.2.1. Виды демонстрационного эксперимента и требования к нему.....	7
1.2.2. Техника постановки и методика показа демонстрационного эксперимента	9
1.3. Лабораторные работы.....	11
1.3.1. Понятие «Лабораторная работа» и её виды	11
1.3.2. Методика проведения лабораторных работ.....	12
Глава 2. Явление рассеяния света.....	16
2.1. История открытия явления.....	16
2.2. Механизм рассеяния света	17
2.3. Неоднородные среды	21
2.4. Виды рассеяния	24
2.5. Поляризация рассеянного света	27
2.6. Применение явления рассеяния света.....	30
Глава 3. Учебный физический эксперимент по наблюдению явления рассеяния света.....	31
3.1. Система учебного физического эксперимента	31
3.2. Методика постановки системы демонстрационного эксперимента по наблюдению рассеяния света.....	32
3.3. Методика постановки лабораторной работы	42
3.4. Методика постановки домашнего эксперимента	46
Заключение	55
Список литературы	56
Приложение 1. Конспект лекции.....	59
Приложение 2. Описание лабораторной работы	77

Приложение 3. Примерный отчёт по лабораторной работе	85
Приложение 4. Описание домашнего эксперимента.....	89
Приложение 5. Примерный отчёт по домашнему эксперименту.....	98

Введение

Учебный физический эксперимент занимает особое место в преподавании физики. Для высокой профессиональной подготовки студентов физиков им необходима большая экспериментальная база. Учебный физический эксперимент играет важную роль. Он помогает в усвоении нового материала, делая его более наглядным, повышает интерес обучающихся, формирует умение применять полученные знания на практике, служит главным звеном для подтверждения или опровержения какой-либо физической теории. Эксперимент, являясь одним из основных методов исследования в науке, при обучении физике может служить и как объект изучения, и как метод обучения. Чтобы изучение какого-либо физического явления было эффективным, необходимо использовать разные виды эксперимента.

Одним из таких явлений, которое рассматривается в разделе «Оптика» курса общей и экспериментальной физики, является рассеяние света.

Актуальность темы выпускной квалификационной работы обусловлена значимостью использования при изучении курса физики, наряду с теоретическим материалом, разных видов эксперимента, что поможет получить наилучший педагогический результат.

Целью работы является разработка для студентов, изучающих явление рассеяния света в разделе «Оптика» курса общей и экспериментальной физики, системы учебного физического эксперимента.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

- Изучить печатную и электронную литературу по учебному физическому эксперименту и явлению рассеяния света;
- Рассмотреть виды учебного физического эксперимента, изучить основные требования к ним;
- Познакомиться с техникой постановки и методикой показа разных видов учебного физического эксперимента;

- Познакомиться с историей открытия явления рассеяния света, изучить механизм возникновения;
- Рассмотреть виды рассеяния света;
- Разработать систему учебного физического эксперимента, помогающую усвоить явление рассеяния света.

Объектом исследования выпускной квалификационной работы является методика проведения физического эксперимента.

Предметом исследования является разработка системы учебного физического эксперимента, помогающая усвоить явление рассеяния света.

Практическая значимость данной работы связана с возможностью использовать разработанную систему учебного физического эксперимента по наблюдению явления рассеяния света при изучении данного явления в разделе «Оптика» курса общей и экспериментальной физики.

Работа состоит из введения, трёх глав и заключения. Первая глава посвящена изучению учебного физического эксперимента, подробно рассматриваются вопросы, связанные с демонстрационным экспериментом и лабораторными работами. Во второй главе описывается явление рассеяния света: механизм его образования, виды. В третьей главе – практической – представлена разработанная система учебного физического эксперимента для изучения светорассеяния, которая содержит: систему демонстрационного эксперимента, лекцию, включающую разработанный демонстрационный эксперимент, лабораторную работу и домашний эксперимент, который выполнен методом компьютерного моделирования.

Работа включает 5 приложений. В приложении 1 представлен конспект лекции, в приложениях 2 и 3 – описание лабораторной работы и примерный отчёт по ней, а в приложениях 4 и 5 представлены описания домашнего эксперимента и примерный отчёт по домашнему эксперименту.

Список литературы включает 20 источников.

Глава 1

Учебный физический эксперимент

1.1. Учебный физический эксперимент и его виды

В учебном предмете «Физика» эксперимент выступает в роли источника знаний и метода исследования. Учебный физический эксперимент – это воспроизведение физического явления с использованием специальных приборов. Физика является экспериментальной наукой, это связано с тем, что для формулировки физических понятий необходимо наличие нескольких этапов: наблюдение явления, определение его связей с другими, введение величин, которые, характеризуют это явление. Эти этапы не могут быть эффективны без использования физического эксперимента. Демонстрация экспериментов, выполнение лабораторных работ и служит основой экспериментального метода обучения физике.

Физический эксперимент способствует вовлечению в разные виды деятельности: формирует мировоззрение, нравственные качества, развивает познавательный интерес, самостоятельность, раскрывает и реализует потенциальные возможности, приобщает к поисковой и творческой деятельности.

По организационному признаку учебный физический эксперимент можно поделить на три вида [1]:

- 1) Демонстрационный эксперимент;
- 2) Лабораторные работы;
- 3) Внеклассные (внеаудиторные) занятия.

Кроме общих задач, которые решают эти виды физического эксперимента, каждый из них обладает более узкими целями и задачами постановки, особенностями методики проведения.

1.2. Демонстрационный эксперимент

1.2.1. Виды демонстрационного эксперимента и требования к нему

Демонстрационный эксперимент – осуществление физического явления с целью его демонстрации и выявления физических закономерностей, проводится преподавателем для одновременного восприятия обучающимися [2]. Главное действующее лицо в демонстрационном эксперименте - преподаватель, который не только организует учебную работу, но и проводит демонстрацию опытов. В основном демонстрационный эксперимент применяют при такой форме занятий, как лекция, но так же он может быть полезен во время докладов, конференций, семинаров и т.д.

Обычно выделяют два вида демонстрационных экспериментов – натурные (количественные и качественные) и модельные [3], к модельным чаще всего относят компьютерные эксперименты. В ходе натурального эксперимента, используя реальное физическое оборудование, можно наблюдать реальные физические явления или физические закономерности. Натурные количественные эксперименты – это эксперименты, при которых демонстрируется как само физическое явление, так и характеризующие его количественные закономерности. Этот вид демонстрационного эксперимента получил свою популярность не так давно. В основном такие эксперименты являются автоматизированными, они требуют специальных установок, оснащённых датчиками физических величин, при этом компьютер собирает данные, обрабатывает их и отображает результат эксперимента в удобном виде. Натурные качественные эксперименты – это эксперименты, при которых демонстрируется какое-либо физическое явление или физическая закономерность.

Содержание демонстрационного эксперимента должно быть понятным каждому наблюдателю. Для этого необходимо выполнение следующих требований при демонстрации [1]:

1. Обеспечение видимости. Демонстрируемый эксперимент должен быть хорошо виден для всех наблюдателей, даже для тех, которые сидят в наиболее отдалённых местах кабинета. Поэтому эксперимент нужно провести заранее и убедиться в том, что он будет ясно виден со всех сторон, в данном помещении при таком же освещении, которое будет при поведении эксперимента, только тогда подготовку к эксперименту, в этом отношении, можно считать завершённой. Чтобы данное требование выполнялось при проведении демонстраций, необходимо использовать специальное оборудование, которое называется демонстрационным. Демонстрационный стол не должен быть загромождён, а экспериментатор не должен загромождать приборы. Большую роль для обеспечения хорошей видимости физического явления играет подбор фона.

2. Упрощённые приборы. Ещё одним требованием к демонстрационному эксперименту является использование упрощённых приборов, для того, чтобы преподавателю не приходилось тратить очень много времени на объяснение их принципа действия и процесса получения наблюдаемого физического явления. Но при этом качество эксперимента не должно быть снижено.

3. Кратковременность. Демонстрации не должны занимать много времени.

4. Выразительность и эмоциональность. Выразительность выполняется тогда, когда из демонстрируемого эксперимента легко понять сущность явления. Демонстрации должны вызывать эмоции, т.е. хорошие впечатления, чувство удивления.

5. Техника безопасности. Проводя демонстрационный эксперимент, преподаватель должен знать правила техники безопасности, соблюдать их и следить за тем, чтобы обучающиеся соблюдали эти правила.

1.2.2. Техника постановки и методика показа демонстрационного эксперимента

Решение о том, нужно ли использовать демонстрационный эксперимент во время лекции или нет, преподаватель принимает во время подготовки к ней. Если демонстрационный эксперимент необходим, то он должен иметь определённые цели.

Цели демонстраций могут быть разными: они знакомят обучающихся с физическими явлениями, делая их нагляднее, служат для подтверждения теоретических положений, помогают популяризировать излагаемый материал, например, когда аудитория обладает недостаточной физико-математической подготовкой, предоставляют аудитории возможность для отдыха, например, когда в лекции рассматриваются трудные для понимания вопросы.

Таким образом, для достижения поставленных целей, лектору, в процессе подготовки к занятию, нужно решить следующие задачи [3]:

- 1) Составить характеристики лекции: тему, вид, длительность лекции и т. д.;
- 2) Подобрать лекционные демонстрации и оборудование к ним;
- 3) Составить план лекции с учетом подобранных лекционных демонстраций;
- 4) Проверить работоспособность лекционных демонстраций.

Экспериментатору важно понимать отличие между понятиями – техника постановки и методика показа демонстрационного эксперимента. Под техникой постановки эксперимента понимают ряд действий, которые служат для подготовки демонстрационного эксперимента к показу на лекции. Методика показа эксперимента - ряд действий, приемов, пояснений, которые служат для показа эксперимента во время проведения лекции.

Разберём вопросы, которые связаны с техникой постановки эксперимента. Подготовку для проведения экспериментов следует начать с составления списка демонстраций или изучения имеющегося. Далее нужно опреде-

лить, какие приборы и материалы требуются для каждого эксперимента, и подготовить их. Затем все необходимые приборы нужно расположить в лекционной аудитории. Подумать, в какой последовательности будут производиться эксперименты, как лучше расположить на демонстрационном столе приборы. Монтировать установки нужно по очереди, т.е. сначала полностью собрать одну установку, а только потом приступать к сбору следующей. Каждый эксперимент должен быть проведён заранее, нужно обязательно убедиться в том, что демонстрации получаются. Также в аудитории должен быть запас необходимых расходных материалов. Для того чтобы исключить возможность травмировать студентов и порчу приборов, необходимо соблюдать меры предосторожности. После завершения показа экспериментов все приборы следует привести в порядок и убрать в шкафы.

Рассмотрим вопросы, связанные с методикой показа демонстрационного эксперимента. В зависимости от вида и целей лекции методика может отличаться, разберём наиболее общие вопросы. Перед проведением демонстрационного эксперимента следует рассказать слушателям об устройстве демонстрационной установки и о плане действий с ней. Во время проведения опыта положение демонстратора должно быть таким, чтобы он не загромождал установку и демонстрируемое явление. Обязательно должен быть рассказан и прокомментирован результат опыта. Комментарии результатов эксперимента должны быть связаны с теоретическим материалом лекции и опираться на знания, которые имеются у слушателей. По возможности показ эксперимента следует повторить, это поможет закрепить полученные знания и лучше усвоить демонстрируемое физическое явление. Для того чтобы подобрать демонстрационные эксперименты к лекциям, рекомендуется использовать специальную литературу – сборники описаний демонстрационных экспериментов, каталоги лекционных демонстраций. Большое количество опытов можно найти в сети интернет, а многие из них можно проделать самим [3].

1.3. Лабораторные работы

1.3.1. Понятие «Лабораторная работа» и её виды

Лабораторная работа – один из видов учебного физического эксперимента, при котором обучающиеся по заданному плану сами воспроизводят и наблюдают физические явления, а так же учатся измерять физические величины. Лабораторные работы выполняют важную функцию при изучении физики. В отличие от демонстрационного эксперимента, в котором обучающиеся играют роль наблюдателей, при проведении лабораторных работ они сами собирают нужную установку, наблюдают явление, выполняют измерения.

Лабораторные работы имеют важное политехническое значение, поскольку именно на них студенты учатся работать с физическими приборами, приобретая практические умения, которые пригодятся им и в жизни. Помогают при формулировке некоторых физических понятий, носят исследовательский характер, что позволяет обучающимся использовать свои знания для познания нового. Лабораторные работы оказывают важное воспитательное значение, делают обучающихся более дисциплинированными, самостоятельными, способствуют развитию лабораторной культуры.

По способу организации лабораторные работы можно разделить на три вида [4]:

- 1) Фронтальные лабораторные работы – это вид работ, когда обучающиеся одновременно выполняют один и тот же эксперимент, пользуясь одинаковым оборудованием. Такие работы обычно делают в группах по два человека и проводят при изучении соответствующего материала.
- 2) Физический практикум – это вид работ, когда каждая группа обучающихся выполняет свой эксперимент. Задания, которые включает физический практикум, охватывают большие темы курса.
- 3) Домашний эксперимент – это вид эксперимента, который обучающиеся проводят дома самостоятельно, используя средства быта.

1.3.2. Методика проведения лабораторных работ

Методика проведения лабораторной работы определяется ее видом.

1. Фронтальная лабораторная работа.

До проведения фронтальной лабораторной работы необходимо подготовить нужные приборы. Выполнение работ осуществляется в группах по два человека, при этом группы формируются так, чтобы каждый обучающийся работал эффективно. Тема лабораторной работы и материал, который нужно повторить для её выполнения сообщается заранее. При фронтальных лабораторных работах начинать следует с вводной беседы, в ходе которой сообщается цель, план лабораторной работы. Проводится инструктаж по записям, расчётам, использованию приборов. Приборы могут быть подготовлены на рабочих столах обучающихся предварительно или раздаются лаборантом, преподавателем после вводной части. После этого обучающиеся, под руководством преподавателя, приступают к выполнению работы. Во время экспериментальной части преподаватель следит за работой, помогает обучающимся, если это необходимо, обращает их внимание на приемы правильной работы с приборами, отмечает нарушение правил техники безопасности. Следит за качеством и степенью самостоятельности выполнения каждым обучающимся. На заключительном этапе производится запись и обработка результатов. Проводится коллективное обсуждение результатов, выявляются причины неправильных. Выставляется оценка.

2. Лабораторный практикум.

Цель лабораторного практикума заключается в том, чтобы дать обучающимся знания, умения, навыки, которые они смогут применить для осуществления физического эксперимента. Для того чтобы добиться этой цели, каждая лабораторная работа включает в себя ряд задач. Обучающиеся должны уметь:

- Объяснять физический смысл рассматриваемого явления;

- Объяснять методику измерений, знать порядок выполнения работы;
- Работать с приборами;
- Грамотно записывать результаты измерений;
- Вычислять погрешности измерений;
- Удобно представить результаты работы;
- Проводить анализ выполненной работы, делать выводы, составлять отчёт.

Особенностью таких работ является, то, что в них главную роль играет самостоятельная работа обучающегося не только при выполнении работы в лаборатории, но и при подготовке дома, обработке измерений, написании отчёта. Каждая работа физического практикума направлена на изучение одного физического явления. Физические практикумы составлены по блокам, блок представляет собой один из разделов физики.

Лабораторный практикум играет очень важную роль при изучении физике в ВУЗе. Первое занятие лабораторного практикума является подготовительным. На нём преподаватель знакомит студентов с правилами техники безопасности в лаборатории, рассказывает, какие этапы включает в себя лабораторная работа, как к ней нужно готовиться, рассказывает теорию погрешностей, знакомит с правилами оформления отчета по лабораторной работе. Здесь же осуществляется деление студентов на пары и знакомство с графиком выполнения лабораторных работ. При выполнении работ физического практикума одновременно выставляются все работы, которые выполняются парами.

Физический практикум включает в себя несколько этапов [5]:

- 1) Подготовка. На данном этапе обучающиеся знакомятся с описанием работы, с принципом действия и устройством необходимых приборов, изучают порядок выполнения работы, должны уметь отвечать на контрольные вопросы.

- 2) Сдача допуска. На данном этапе преподаватель проверяет уровень подготовки обучающихся: как они усвоили теоретический материал, знают ли ход работы, умеют ли пользоваться оборудованием. Если преподаватель считает, что обучающийся недостаточно подготовился, то такой студент к выполнению работы не допускается.
- 3) Выполнение эксперимента. Здесь студенты собирают необходимую установку (правильность сборки обязательно должна быть проверена преподавателем или лаборантом), наблюдают явление, выполняют измерения и записывают все полученные прямые данные, которые затем проверяет преподаватель и ставит свою подпись.
- 4) Обработка результатов. В зависимости от количества часов, отведенных на лабораторную работу, данный этап может происходить, как в лаборатории (если остаётся время), так и дома. Студенты делают необходимые вычисления, производят расчёт погрешностей, строят графики (при необходимости), делают выводы и оформляют отчёт в соответствии с указанными требованиями.
- 5) Сдача отчёта. Готовый отчёт студенты сдают преподавателю на проверку в начале каждого лабораторного занятия. Он смотрит, правильно ли оформлен отчёт, проверяет численные результаты и выводы.

Оценка по дисциплине ставится только при выполнении всех работ и наличии по ним отчётов.

3. Домашний эксперимент.

Этот вид лабораторных работ решает следующие задачи: позволяет замечать физические явления в повседневной жизни; измерять физические величины средствами, которые могут быть использованы в домашних условиях, или, используя самостоятельно изготовленные приборы; повышать мотивацию к изучению физики при помощи эксперимента. Особенно такого вида эксперименты могут быть полезны для школьников.

В качестве особенностей домашнего эксперимента можно выделить следующие [6]:

- 1) Он носит индивидуальный характер, даже когда весь класс должен выполнить одну лабораторную работу, поскольку эта работа выполняется дома, без учителя и одноклассников.
- 2) Составляя задания, учитель может не учитывать то, что скорость выполнения заданий у разных учеников разная.

Этот вид лабораторных работ может проводиться по теме, которая изучается на данный момент или после изучения темы, раздела, в качестве контроля знаний.

В ходе домашнего эксперимента перед обучающимися стоит задача проделать и описать опыт, а так же уметь делать вывод, используя свои знания.

Важное внимание следует уделять требованиям, предъявляемым к подбору домашних лабораторных работ:

- 1) Безопасность;
- 2) Простота оборудования;
- 3) Наличие описания к работе;
- 4) Отчёты по выполнению работы;
- 5) Обсуждение результатов.

Одним из способов организации домашних экспериментов может выступать эксперимент, выполненный методом компьютерного моделирования, что позволяет проводить в домашних условиях не только простые, но и более сложные эксперименты, ведь компьютерная модель – это модель, которая создана при помощи компьютерной программы. В качестве главных плюсов таких экспериментов можно выделить то, что они позволяют наблюдать физическое явление, которое невозможно или очень сложно провести в реальности, а так же они дают возможность использовать вместо необходимых физических приборов, которые не всегда есть, компьютерную программу.

Глава 2

Явление рассеяния света

2.1. История открытия явления

Рассеяние света – это физическое явление, в ходе которого свет, распространяясь в среде и взаимодействуя с другим веществом, отклоняется по разным направлениям.

Цвет неба есть результат рассеяния солнечного света на молекулах газов, составляющих земную атмосферу [7].

Ещё Лукреций Кар (I в. до н. э.) рассматривал свет, который рассеивался пылинками, и их движение. Объяснить голубой цвет неба пытались Леонардо да Винчи (XV в.), Ньютон (XVII в.), Клаузиус (XIX в.), но безрезультатно.

Первым, кто экспериментально изучал явление рассеяния света, был английский физик Джон Тиндаль. В 1869 г. Тиндаль в лаборатории рассматривал рассеяние света на частицах, размеры которых малы, по сравнению с длиной волны видимого света. Он заметил, «что рассеянный под различными углами свет отличается от первоначального белого цвета синим оттенком, а свет, рассеянный под углом $\pi/2$ относительно направления падающего света, полностью или почти полностью линейно-поляризован» [8].

Теоретическим изучением явления рассеяния света занимался британский физик Рэлей. В 1899 г. он показал, что если размеры неоднородностей порядка $0,1\lambda$, то интенсивность рассеянного света обратно пропорциональна четвёртой степени длины волны, т.е. $I \sim \frac{1}{\lambda^4}$, данное соотношение получило название закона Рэля. Если же размеры неоднородностей велики, то интенсивность рассеянного света обратно пропорциональна квадрату длины волны, т.е. $I \sim \frac{1}{\lambda^2}$.

Явление рассеяния света наблюдалось и в средах без каких-либо примесей и загрязнений, поэтому Л. И. Мандельштам в 1907 г. высказал идею, о том, что есть физическая причина, которая приводит к появлению оптических неоднородностей в среде. Одна из таких причин была найдена М. Смолуховским в 1908 г. Он заметил большую сжимаемость среды при критической температуре. В результате большой сжимаемости наблюдалось тепловое движение молекул, в ходе которого концентрация молекул в одних точках среды увеличивалась, а в других – уменьшалась, это флуктуации плотности.

Изучением молекулярного рассеяния света на поверхности жидкости занимался Л. И. Мандельштам. В 1913 г. он представил работу, в которой изложил теорию явления и описал эксперимент.

В XX в. группы учёных из России, Индии и Франции пытались найти в рассеянном свете свет, длина волны которого отличалась бы от длины волны исходного пучка, двум первым группам это удалось. Таким образом, другой вид рассеяния – комбинационное рассеяние света – был открыт в 1928 году почти одновременно и независимо Л. И. Мандельштамом и Г. С. Ландсбергом в Москве и Ч. В. Раманом и К. С. Кришнаном в Калькутте (Индия) [9]. За открытие этого явления Ч. В. Раман в 1930 году получил Нобелевскую премию, а само явление часто называют эффектом Рамана или рамановским рассеянием.

2.2. Механизм рассеяния света

Свет, проходя через среду, может рассеиваться, т.е. энергия света перераспределяется по направлениям. Исходя из классических представлений о физике, свет, распространяясь в веществе, вызывает колебания электронов в атомах. Эти электроны, в свою очередь, являются источниками вторичных волн, которые распространяются по разным направлениям. Вторичные волны

будут когерентны, поэтому нужно помнить об их взаимной интерференции. При условии, что показатель преломления среды остаётся постоянным в разных её точках, т.е. среда является оптически однородной, вторичные волны будут гасить друг друга по всем направлениям, кроме того направления, в котором распространялась первичная волна, тогда явления рассеяния света не наблюдается. Докажем это утверждение. Для этого рассмотрим прохожде-ние плоской монохроматической волны в однородной среде (рис. 1):

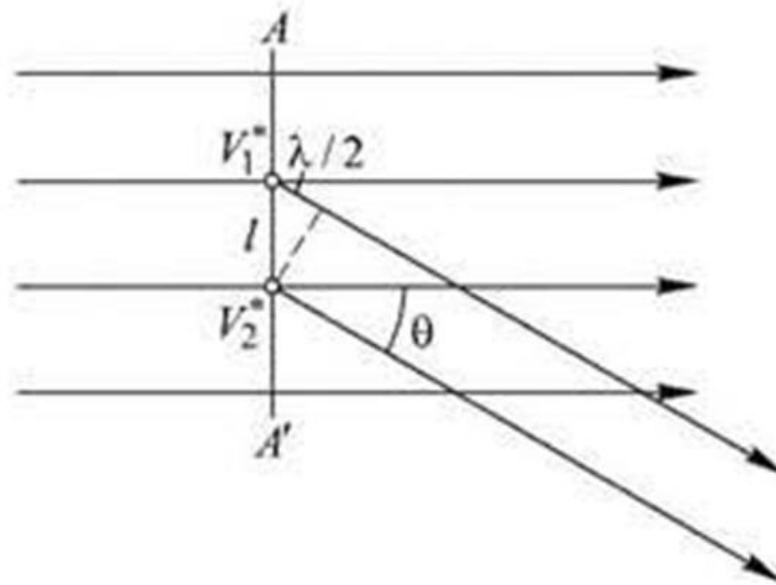


Рис. 1. Распространение плоской монохроматической волны в однородной среде [8]

Пусть AA' – волновой фронт, V_1^* - объём, линейные размеры которого меньше длины волны λ падающего света, заключающий столько молекул, что среду можно считать сплошной. Этот объём под углом θ создаёт вторичную волну, которая характеризуется некоторым значением амплитуды и фазы. V_2^* - второй объём волнового фронта AA' . Этот объём испускает вторичную волну такой же амплитуды, как и V_1^* , но в точку наблюдения эта вторичная волна приходит в противофазе с волной, испускаемой объёмом V_1^* , из-за разности хода. Поэтому, эти волны будут полностью гасить друг друга.

Величина l может быть найдена из рассмотрения прямоугольного треугольника на рис. 1.

$$l = \frac{\lambda}{2} \sin \theta \quad [8]. \quad (1)$$

Таким образом, если в оптически однородной среде рассматривать любую другую пару равновеликих объёмов волнового фронта, находящихся на расстоянии l друг от друга, то они также будут испускать вторичные волны, которые будут гасить друг друга. Поэтому рассеяния света не наблюдается. Тогда можно сделать вывод, что условием отсутствия рассеяния света является когерентность вторичных волн и наличие однородной среды.

В реальности оптически однородных сред не бывает, всегда присутствуют неоднородности разного происхождения, поэтому рассеянный свет всегда существует, но имеет разную интенсивность. В случае, когда среда неоднородна, вторичные волны не будут гасить друг друга по разным направлениям, они дифрагируют на неоднородностях среды, и получаемая дифракционная картина характеризуется равномерным распространением интенсивности по разным направлениям. Эта дифракция на мелких неоднородностях среды получила название рассеяния света. Для того чтобы среда была оптически неоднородной, нужно, чтобы показатель преломления среды был разным в различных её точках. Связь показателя преломления с диэлектрической проницаемостью среды имеет вид:

$$n = \sqrt{\varepsilon}, \quad \varepsilon E = E + 4\pi P \quad [8],$$

где E – внешнее поле, P – поляризация среды – электрический момент, который приобретает единица объёма среды в результате действия внешнего поля. В свою очередь, $P = Np$ [8], N – количество молекул, которое содержит единица объёма, p – электрический момент, который получает каждая молекула в результате действия поля E . Электрический момент $p = \alpha E$, α – коэффициент поляризуемости, характеризующий строение молекулы. Тогда:

$$P = N\alpha E,$$

$$\varepsilon E = E + 4\pi N\alpha E, \quad (2)$$

$$\varepsilon = 1 + 4\pi N\alpha [8]. \quad (3)$$

Видно, что если показатель преломления среды не изменяется, то для одинаковых объёмов произведение $N\alpha$ в разных точках среды будет постоянным. Следовательно, если однородная среда состоит из одинаковых молекул, т.е. $\alpha = const$, то $N = const$. В том случае, когда среда включает разные молекулы, то для того, чтобы показатель преломления был постоянным, необходимо произвести подбор N и α . Например, можно таким образом подобрать смесь бензола и сероуглерода с помещёнными в неё кусочками стекла, что её можно будет считать оптически однородной. А граница раздела между кусочками стекла и жидкостью становится незаметной. С помощью данного метода можно определять показатели преломления прозрачных твёрдых веществ произвольной формы по показателю преломления жидкости.

Рассмотрим схему распространения света в оптически неоднородной среде (рис. 2):

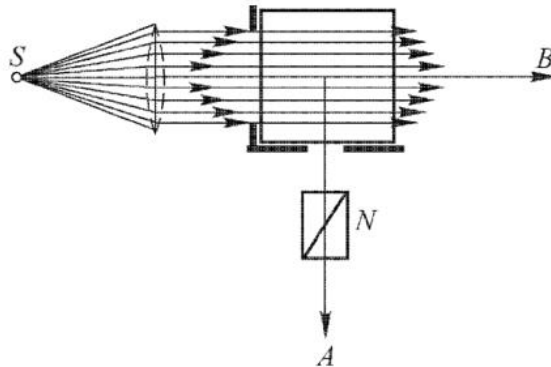


Рис. 2. Распространение плоской монохроматической волны в мутной среде [8]

Пучок света от источника S попадает в неоднородную среду и рассеивается. Если смотреть в направлении A , рассеянный свет содержит преимущественно короткие волны и поэтому имеет более голубой оттенок, чем свет источника S , а свет, идущий в направлении B , имеет красноватый оттенок, т.к. обогащён длинными волнами. Свет, идущий от источника S , является

естественным, а свет, рассеянный под углом равным 90° к исходному световому пучку, оказывается линейно поляризованным, это можно обнаружить, поставив на его пути поляризатор N . Интенсивность света I , рассеянного в разных направлениях, симметрична относительно оси первичного пучка и относительно перпендикулярной ей линии.

Кривая, с помощью которой графически можно представить интенсивность светорассеяния по разным направлениям, называется индикатрисой рассеяния (рис. 3) и при естественном падающем свете имеет вид:

$$I \sim 1 + \cos^2 \theta \quad [8] \quad (4)$$

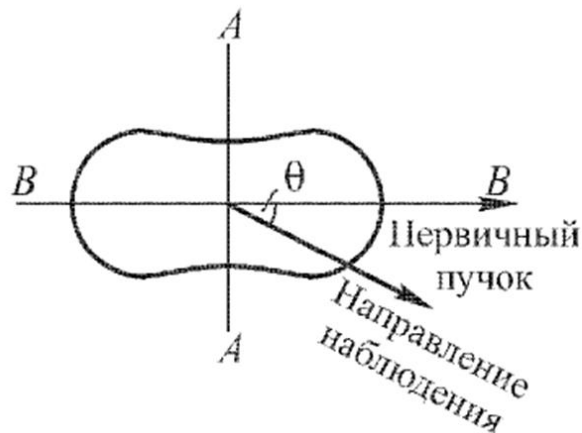


Рис. 3. Индикатриса рассеяния [8]

2.3. Неоднородные среды

Известно, что свет, проходя через вещество, теряет часть своей энергии, т.е. эта энергия поглощается веществом. В результате интенсивность света, при прохождении им вещества, становится меньше. Пусть свет проходит сквозь прозрачный слой толщиной d (рис. 4):

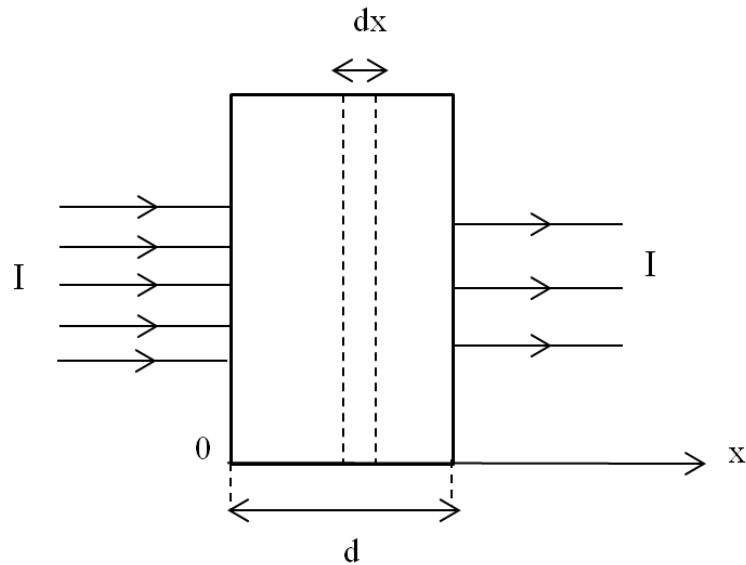


Рис. 4. Прохождение светом прозрачного слоя толщиной d

Пусть I_0 – интенсивность, которую имеет падающий свет, I – интенсивность света, прошедшего через слой. Т.к. слой поглотил часть света, то $I < I_0$. Из этого слоя выберем бесконечно тонкий слой толщиной dx . Изменение интенсивности будет прямо пропорционально толщине слоя и интенсивности падающего света.

$$dI = -\chi I_0 dx [10], \quad (5)$$

где χ – коэффициент пропорциональности, независящий от интенсивности света. Знак « $-$ » в выражении показывает, что при увеличении толщины слоя интенсивность света становится меньше.

Преобразуем данное выражение, разделив правую и левую части на I_0 , получим:

$$\frac{dI}{I_0} = -\chi dx.$$

Проинтегрируем:

$$\int_{I_0}^I \frac{dI}{I_0} = -\chi \int_0^d dx$$

$$\ln I - \ln I_0 = -\chi d$$

$$\ln \frac{I}{I_0} = -\chi d$$

$$\frac{I}{I_0} = e^{-\chi d}$$

$$I = I_0 e^{-\chi d}. \quad (6)$$

Полученное выражение (6) носит название закона Бугера, по имени учёного, открывшего его в 1729 г. Из закона видно, что проходя через вещество, интенсивность света убывает по экспоненциальному закону. Коэффициент χ называется коэффициентом поглощения, он зависит от свойств вещества.

Проходя через оптически неоднородную среду, свет будет не только поглощаться веществом, но и рассеиваться. Вследствие светорассеяния интенсивность света в направлении распространения будет убывать быстрее, чем только при одном поглощении. Поэтому в законе Бугера появится ещё один коэффициент – χ' – коэффициент экстинкции, а сам закон примет вид:

$$I = I_0 e^{-(\chi+\chi')d} [10]. \quad (7)$$

Как уже было сказано выше, для возникновения светорассеяния необходимо наличие оптических неоднородностей в веществе. Эти неоднородности бывают двух типов.

Если оптические неоднородности среды носят явный характер, такие среды называют мутными. Мутными средами являются [10]: дым – взвесь мельчайших твердых частиц в газе; туман – взвесь в газах капель жидкости; суспензии – твёрдые частички в жидкости; эмульсии – капельки одной жидкости в другой. К мутным средам относятся и некоторые твёрдые тела, такие, как: опалы, перламутр, молочное стекло и другие. Рассеяние в мутных средах называют явлением Тиндаля.

Второй вид оптических неоднородностей – неоднородности, которые появляются в чистом веществе из-за флуктуаций плотности. Рассеяние света на таких неоднородностях называется молекулярным, например, рассеяние света в атмосфере.

2.4. Виды рассеяния

В зависимости от соотношения между длиной волны (частотой) и размером неоднородностей различают несколько видов светорассеяния. Пусть λ_n – длина волны падающего света, λ_p – длина волны рассеянного света, тогда:

- 1) если $\lambda_n = \lambda_p$, то такое рассеяние называют упругим. К упругому рассеянию относят: рэлеевское рассеяние и рассеяние Ми.
- 2) если $\lambda_n \neq \lambda_p$, то такое рассеяние называют неупругим. К нему относят: рассеяние Мандельштама – Бриллюэна и комбинационное рассеяние.

Рэлеевское рассеяние – это вид рассеяния на неоднородностях среды, при котором длина волны остаётся постоянной. Такое рассеяние можно наблюдать, когда размеры оптических неоднородностей d много меньше длины волны: $d \ll \lambda$.

Этот вид рассеяния называется рэлеевским, по имени британского физика Джона Рэля, который в 1899 г. рассчитал интенсивность рассеянного света:

$$I = I_0 \frac{9\pi^2 \varepsilon_0^2 N (V')^2}{2\lambda^4 L^2} \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon + \varepsilon_0} \right)^2 (1 + \cos^2 \theta) \quad [8], \quad (8)$$

где N – число частиц в рассеивающем объёме, V' и ε – объём и диэлектрическая проницаемость частицы, ε_0 – диэлектрическая проницаемость среды, в которой взвешены частицы, θ – угол рассеяния, I_0 – интенсивность падающего света, L – расстояние от рассеивающего объёма до точки наблюдения [8].

Из данной формулы видно, что интенсивность рассеянного света обратно пропорциональна длине волны в четвёртой степени $I \sim \frac{1}{\lambda^4}$ [8] – закон Рэля – и прямо пропорциональна квадрату объёма рассеивающей частицы

$I \sim (V^*)^2$. Эти утверждения будут верны, только когда размеры неоднородностей не превышают $\sim 0,1\lambda$. Индикатриса рассеяния, в этом случае, имеет вид, представленный на рис. 3. Множитель $\left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon + \varepsilon_0}\right)^2$ можно характеризовать, как меру оптической неоднородности. В случае, когда диэлектрическая проницаемость частицы и среды равны, т.е. $\varepsilon = \varepsilon_0$, то рассеянный свет отсутствует.

Рэлеевское рассеяние, в свою очередь, можно разделить на два вида. Если причиной оптических неоднородностей среды, на которых рассеивается свет, являются флуктуации плотности, то такое рассеяние называют молекулярным. Если же неоднородность среды вызвана включением в неё инородных частиц, то такое рассеяние называют рассеянием в дисперсных системах.

При молекулярном рассеянии флуктуации плотности $\Delta\rho$ приводят к флуктуации показателя преломления Δn , а, следовательно, и к флуктуации диэлектрической проницаемости $\Delta\varepsilon$ ($\varepsilon \equiv n^2$) [8], которые и являются причиной оптических неоднородностей.

Эйнштейн рассчитал интенсивность рассеянного света I , вызванного флуктуациями плотности, и пришёл к следующему результату:

$$I = I_0 \frac{\pi^2}{2\lambda^4 L^2} V^* V \overline{(\Delta\varepsilon)^2} (1 + \cos^2 \theta) [8], \quad (9)$$

где V^* – объём флуктуаций, малый по сравнению с длиной волны света, но включающий большое число молекул [8]. При молекулярном рассеянии, в качестве меры оптической неоднородности выступает множитель $\overline{(\Delta\varepsilon)^2}$. Остальные обозначения остаются такими же, как и при расчёте интенсивности рассеянного света Рэлеем.

Рассеяние Ми – упругое рассеяние на неоднородностях среды, размеры которых больше длины волны или равны ей: $d \geq \lambda$. В этом случае зависимость интенсивности рассеянного света от длины волны имеет слабый ха-

ракти. При этом только часть рассеянного света оказывается поляризованной. Индикатриса рассеяния имеет более сложный характер (рис. 5) и зависит от формы, размера, природы частицы и самой среды:

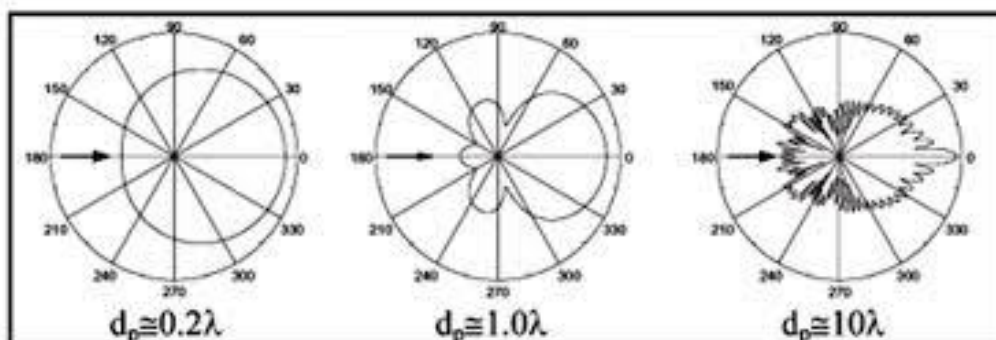


Рис. 5. Индикатриса рассеяния Ми [11]

Рассеяние Мандельштама – Бриллюэна – это тоже рассеяние на флуктуациях, но флуктуациях, которые коррелированы в пространстве, эти флуктуации можно представить, как совокупность распространяющихся упругих волн в среде, а значит, изменение плотности, следовательно, изменение оптических свойств. Таким образом, рассеяние на упругих волнах – это и есть рассеяние Мандельштама – Бриллюэна (рис. 6).



Рис. 6. Рассеяние света на упругой волне [12]

При таком рассеянии происходит изменение длины волны, т.е. оно является неупругим. Этот вид рассеяния был независимо открыт в 1918 г. Л. И.

Мандельштамом и в 1922 г. Л. Бриллюэном. Экспериментально обнаружен в 1930 г. Г. С. Ландсбергом и Мандельштамом в кристаллах и Е. Ф. Гроссом в жидкостях.

Комбинационное рассеяние – рассеяние на молекулах и атомах, при котором длина волны рассеянного света отлична от первоначальной. Механизм комбинационного рассеяния можно понять, если использовать упрощённое представление о световых квантах.

Свет распространяется в веществе и взаимодействует с ним порциями энергии (квантами), величиной $h\nu_0$. Эти порции энергии называются фотонами. Молекула или атом, с происходящими в них колебаниями с частотой ν_i , обладают энергией $h\nu_0$, которая может испускаться молекулой (атомом) в виде света той же частоты. При столкновении фотонов с молекулами (атомами), первые меняют своё направление, рассеиваясь в стороны. Основная причина такого рассеяния состоит в том, что молекулы и атомы могут находиться в основном или в возбуждённом состоянии. В первом случае, фотон отдаёт молекуле (атому) соответствующую часть энергии и тогда энергия рассеянного кванта составляет $h\nu' = h\nu_0 - h\nu_i$ [8]. Если же молекула (атом) находится в возбуждённом состоянии, то фотон забирает энергию, тогда энергия рассеянного кванта составляет $h\nu' = h\nu_0 + h\nu_i$ [8].

2.5. Поляризация рассеянного света

Пусть на молекулу в направлении ОУ от источника S падает естественный свет (рис. 7).

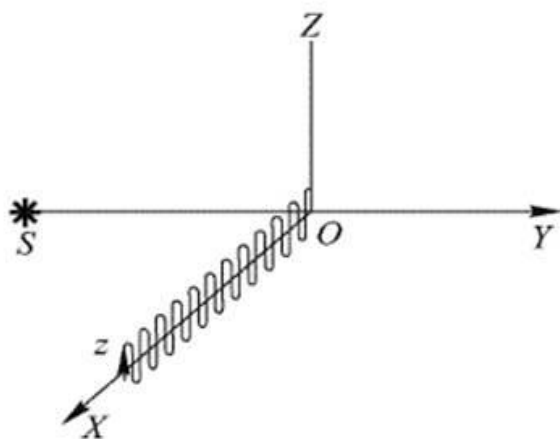


Рис. 7. Поляризация рассеянного света [8]

Тогда электрический вектор будет совершать колебания в плоскости ZOХ, т.е. в направлении, перпендикулярном направлению распространения света от источника. В направлении ОХ происходит светорассеяние, направление электрического вектора в данном случае будет перпендикулярно ОХ. Тогда, если угол между рассеянным и падающим светом составляет 90° , то колебания электрического вектора будут происходить только вдоль ОZ, т.е. рассеянный свет будет полностью поляризованным. Но дальнейшие наблюдения привели к выводу о том, что обычно это не так.

Пусть I_y – интенсивность света, в котором колебания электрического вектора происходят вдоль ОY, I_z – интенсивность света с колебаниями вдоль оси ОZ, тогда степень поляризации Π имеет вид:

$$\Pi = \frac{I_z - I_y}{I_z + I_y} [8]. \quad (10)$$

Из данного соотношения видно, что если $I_y = 0$, то степень поляризации $\Pi = 1$. Опыт показывает, что I_y не всегда равна нулю: свет частично деполаризован. Величина Δ принята за меру деполаризации:

$$\Delta = \frac{I_y}{I_z} [8]. \quad (11)$$

Например, для водорода $\Delta = 1\%$, для азота $\Delta = 4\%$. Жидкости обладают большей деполяризацией, чем газы, так для бензола, например, $\Delta = 44\%$, а для нитротолуола $\Delta = 80\%$ [8].

Рэлей объяснил данное явление, указав на его связь с оптической анизотропией молекул, выступающих в роли рассеивателей. Направление возникающей в анизотропной молекуле электрической поляризации не совпадает с направлением электрического поля волны. Пусть молекула (AB – модель молекулы, рис. 8) поляризуется вдоль одного направления.

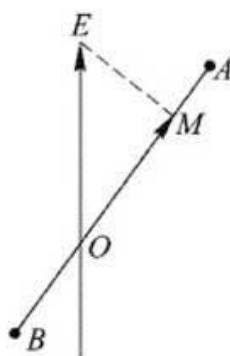


Рис. 8. Модель сильно анизотропной молекулы [8]

Поле, имеющее направление вдоль OE, создаёт колебания вдоль OA, амплитуда этих колебаний будет пропорциональна слагающей поля OM, значение которой определяется величиной угла EOA. В случае, когда среду составляют такие молекулы, вторичная волна имеет электрические компоненты и вдоль OZ, и вдоль OY (рис. 9), их относительные величины будут зависеть от степени анизотропии молекулы.

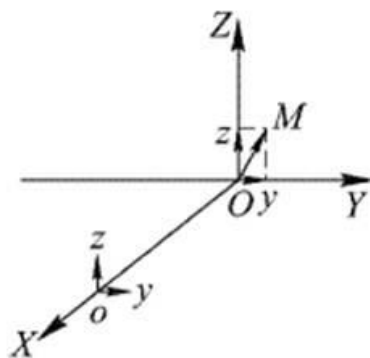


Рис. 9. Деполяризация при рассеянии анизотропными молекулами [8]

Таким образом, свет, рассеянный под прямым углом к падающему, является частично поляризованным.

2.6. Применение явления рассеяния света

Явление светорассеяния может быть использовано при различных физических, химических, биологических исследованиях. Спектры рассеянного света позволяют установить молекулярные и атомные свойства веществ. С помощью данного явления можно определять размеры, а иногда даже форму частиц, что важно для исследований оптики и при лабораторных исследованиях дисперсных систем. Благодаря методу комбинационного рассеяния, можно исследовать молекулярное строение: находить собственную частоту колебаний молекулы; делать выводы о характере симметрии молекулы; определять значение сил внутри молекулы. Спектры комбинационного рассеяния помогают производить анализ сложных молекулярных смесей, когда химические методы анализа не дают желаемых результатов. Так, например, спектроскопия комбинационного рассеяния света широко применяется в медицине – для анализа взаимодействия медицинских препаратов с живыми клетками; в биологии – для классификации различных клеток и микроорганизмов, анализа внутриклеточной структуры; в пищевой промышленности – для анализа содержания сельскохозяйственных ядохимикатов в сырье и т.д [13]. А с помощью рассеяния Мандельштама-Бриллюэна можно измерять скорости ультразвука в веществе.

Глава 3

Учебный физический эксперимент по наблюдению явления рассеяния света

3.1. Система учебного физического эксперимента

Для экспериментального изучения явления рассеяния света нами была разработана система учебного физического эксперимента, которая содержит: систему демонстрационного эксперимента, лекцию, включающую разработанный демонстрационный эксперимент, лабораторную работу и домашний эксперимент.

1. Система демонстрационного эксперимента, включает три демонстрации:

- Демонстрация №1. «Наблюдение рэлеевского рассеяния света»;
- Демонстрация №2. «Наблюдение поляризации рассеянного света»;
- Демонстрация №3. «Зависимость интенсивности рассеянного света от длины волны».

Главная цель этих демонстраций – повышение наглядности изложенного материала и подтверждение теоретических положений.

2. Лекция – «Рассеяние света». Цель лекции: Сформировать представление о явлении рассеяния света.

3. Лабораторная работа – «Распространение света в мутной среде». Цель работы: наблюдение поглощения и рассеяния света в мутной среде, определение величины ослабления света, прошедшего через мутную среду.

4. Домашний эксперимент – «Рассеяние света в мутных средах», выполнен методом компьютерного моделирования. Цель работы: познакомиться с явлением рассеяния света в мутных средах, с помощью компьютерного моделирования изучить его характеристики.

3.2. Методика постановки системы демонстрационного эксперимента по наблюдению рассеяния света

В рамках данной работы была разработана система демонстрационного эксперимента, состоящая из трёх демонстраций. Первая демонстрация позволяет наблюдать рэлеевское рассеяние света, вторая – помогает доказать, что рассеянный свет является поляризованным, а с помощью третьей демонстрации хорошо становится видно, что интенсивность рассеянного света зависит от длины волны падающего. Каждая из этих демонстраций представляет собой натуральный качественный эксперимент.

При разработке эксперимента главная задача заключалась в том, чтобы подобрать вещество, дающее среду с необходимым размером неоднородностей. В качестве оптически однородной среды была использована вода, а в качестве неоднородностей были испробованы одеколон, мел, молоко, гуашь, и белок. Явление хорошо наблюдалось при использовании одеколona, белка и молока, но лучше всего добиться нужного эффекта удалось, применяя одеколон.

Для демонстраций были подготовлены следующие приборы и материалы: оптическая скамья, источник света, диафрагма, линза, экран, поляриод, лазеры (красный и фиолетовый), стеклянная кювета, вода, одеколон.

Главная цель экспериментов – повышение наглядности изложенного материала и подтверждение теоретических положений.

Для лучшего понимания механизма рассеяния света эксперименты лучше показывать после изложения теоретического материала, а при демонстрации дополнять комментариями.

Для выполнения одного из требований демонстрационного эксперимента – обеспечения хорошей видимости – эксперимент проводился в тёмном помещении, хорошую видимость явления так же обеспечил подходящий размер кюветы (5 л).

Данные демонстрации занимают не более 10 минут, они являются выразительным, поскольку легко становится ясным явление рассеяния в мутных средах.

Демонстрация №1

Наблюдение рэлеевского рассеяния света

Схема эксперимента (рис. 10):

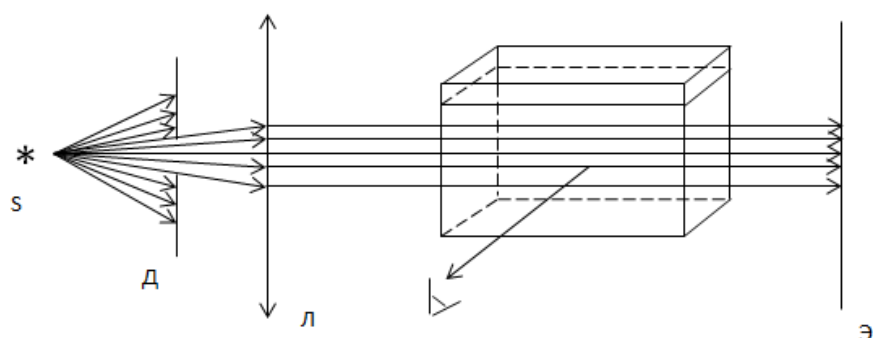


Рис. 10. Схема

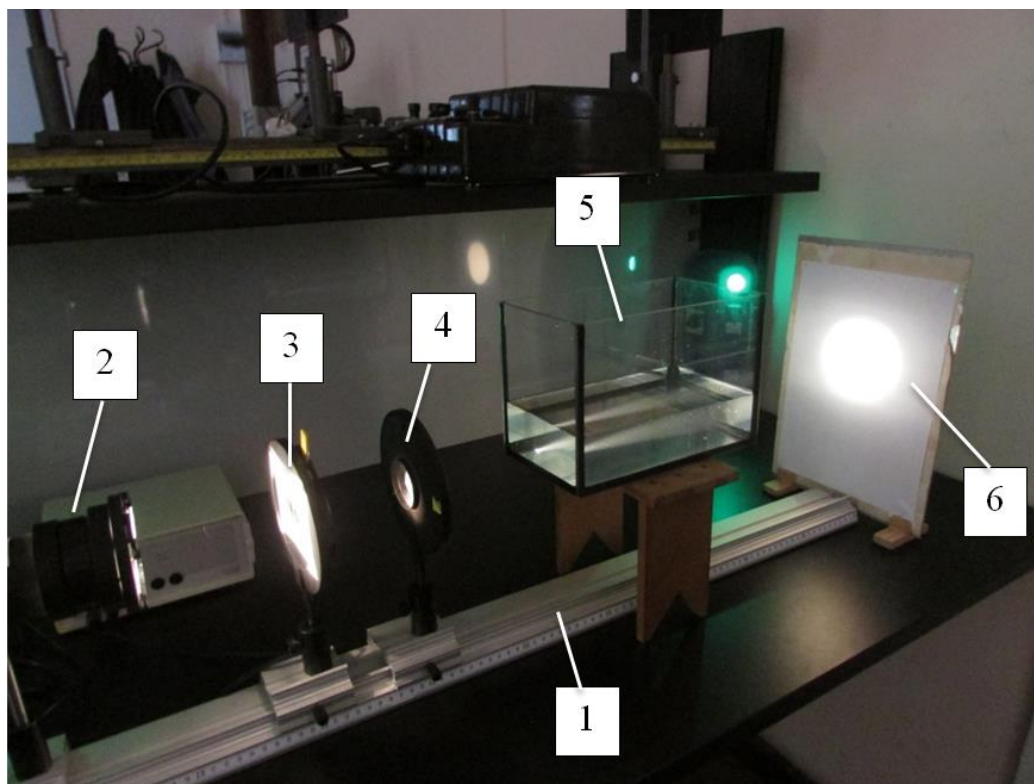


Рис. 11. Экспериментальная установка

Составные части схемы (рис. 11):

- 1) Оптическая скамья;
- 2) Источник света;
- 3) Диафрагма;
- 4) Линза;
- 5) Кювета с мутной средой;
- 6) Экран.

Постановка и объяснение эксперимента:

Установка выполнена на оптической скамье, в качестве исходной среды используется вода, налитая в кювету.

Луч света входит в кювету с водой, т.к. среда оптически однородная, то сбоку луч света не виден, а свет, выходящий на экран, кажется белым, т.е. там присутствуют и синие и красные компоненты спектра (рис. 12).

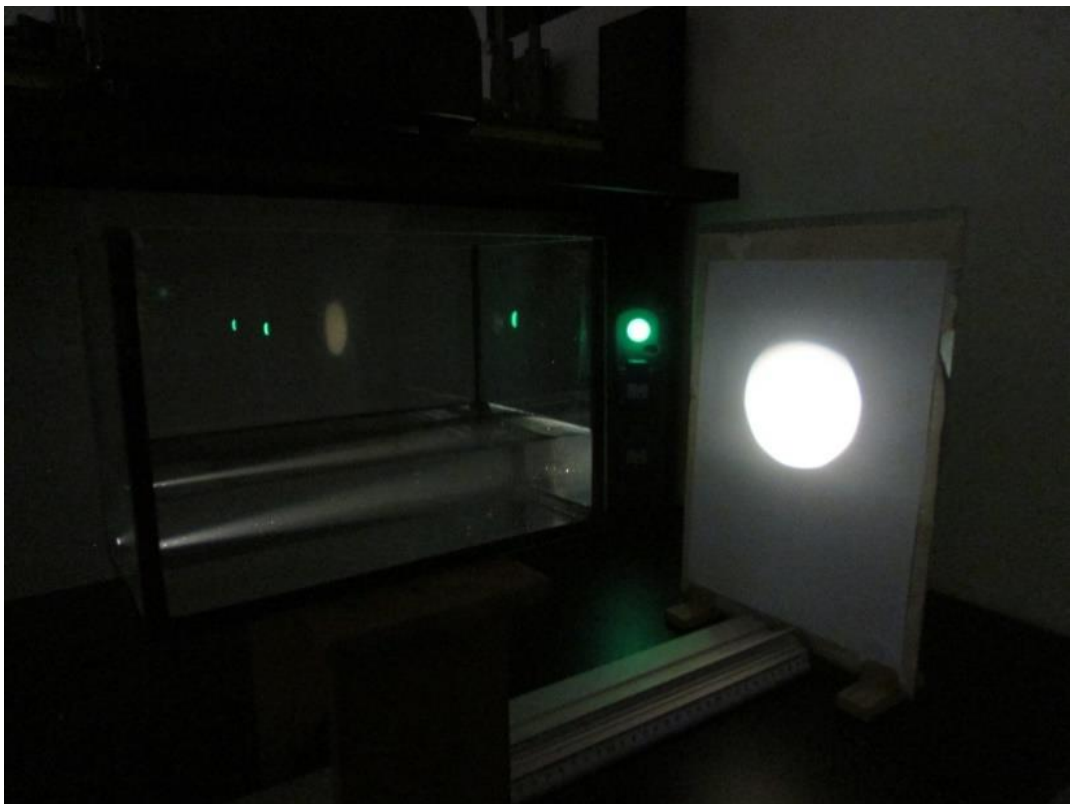


Рис. 12. Прохождение света через оптически однородную среду

Для того чтобы получить рассеивающую среду добавим в неё рассеивающие центры. В качестве рассеивателя использовали одеколон.

В результате среда станет оптически неоднородной и будет рассеивать свет.

Видно, что на начальном этапе свет кажется голубоватым, а чем дальше он проходит, тем более желтоватый оттенок он приобретает, а на экране видим пятно с ярко-выраженным желтоватым оттенком (рис. 13).

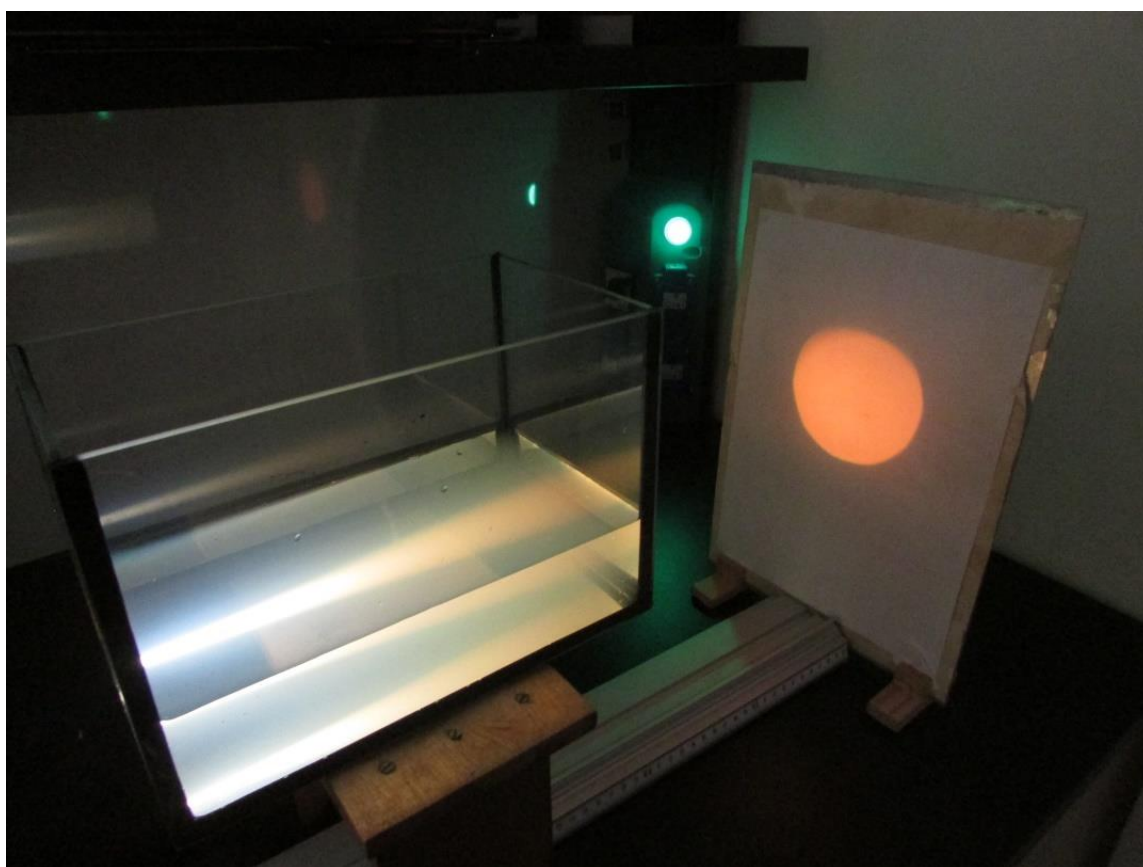


Рис.13. Прохождение света в мутной среде

Демонстрация №2

Наблюдение поляризации рассеянного света

Для того чтобы показать, что рассеянный свет является поляризованным сделаем следующую демонстрацию.

Схема эксперимента (рис. 14):

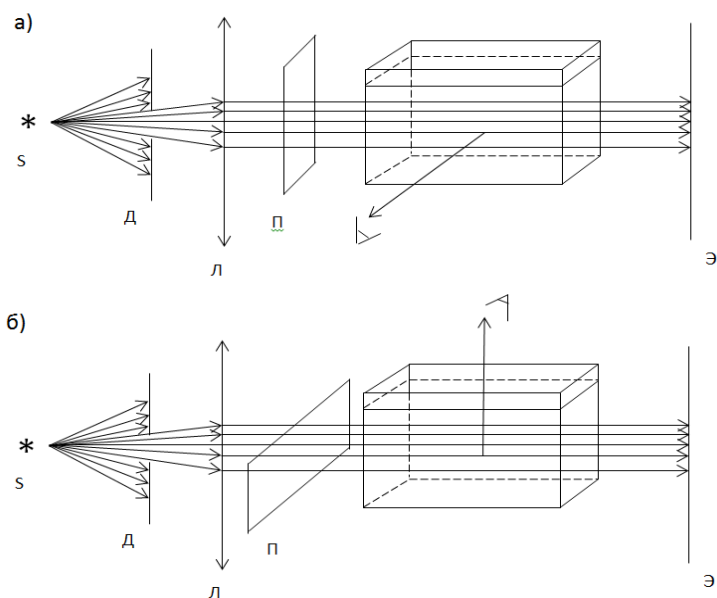


Рис. 14. Схема

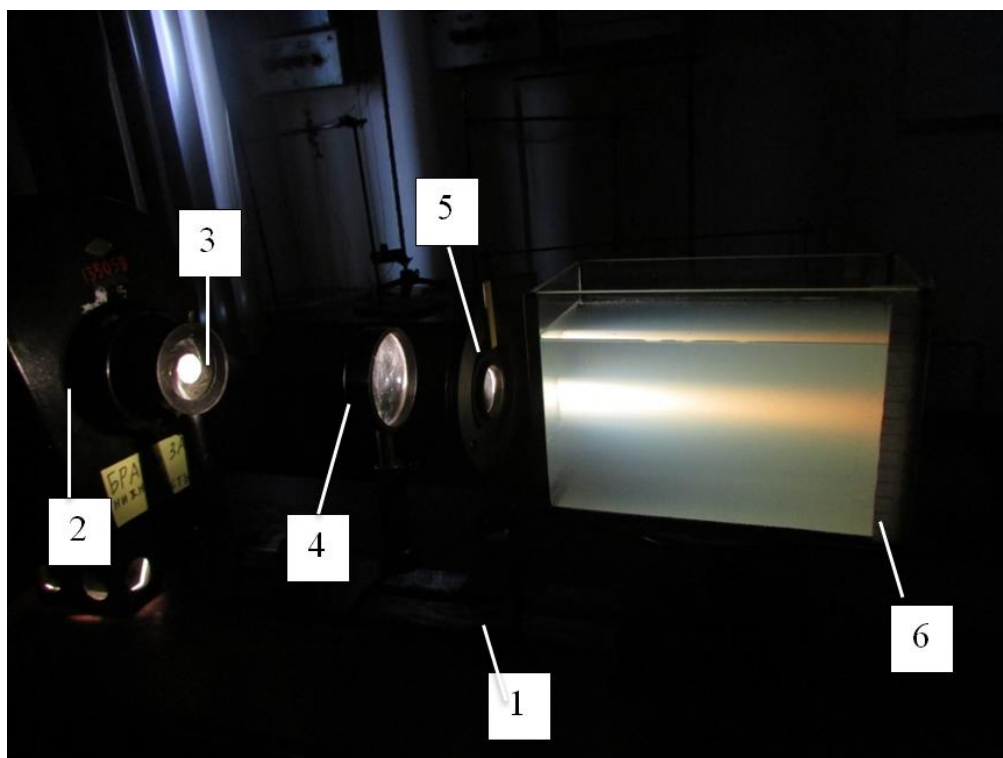


Рис. 15. Экспериментальная установка

Составные части схемы (рис. 15):

- 1) Оптическая скамья;
- 2) Источник света;
- 3) Диафрагма;
- 4) Линза;
- 5) Поляроид;
- 6) Кювета с мутной средой.

Постановка и объяснение эксперимента:

Источник света испускает естественный свет. Перед кюветой с мутной средой поставим поляроид, это означает, что на соответствующий объём, заполненный водой, падает линейно-поляризованный свет. При одном положении поляроида, т.е. в случае вертикальной поляризации (рис. 14 а) мы видим рассеянный свет в боковых направлениях (рис. 16).

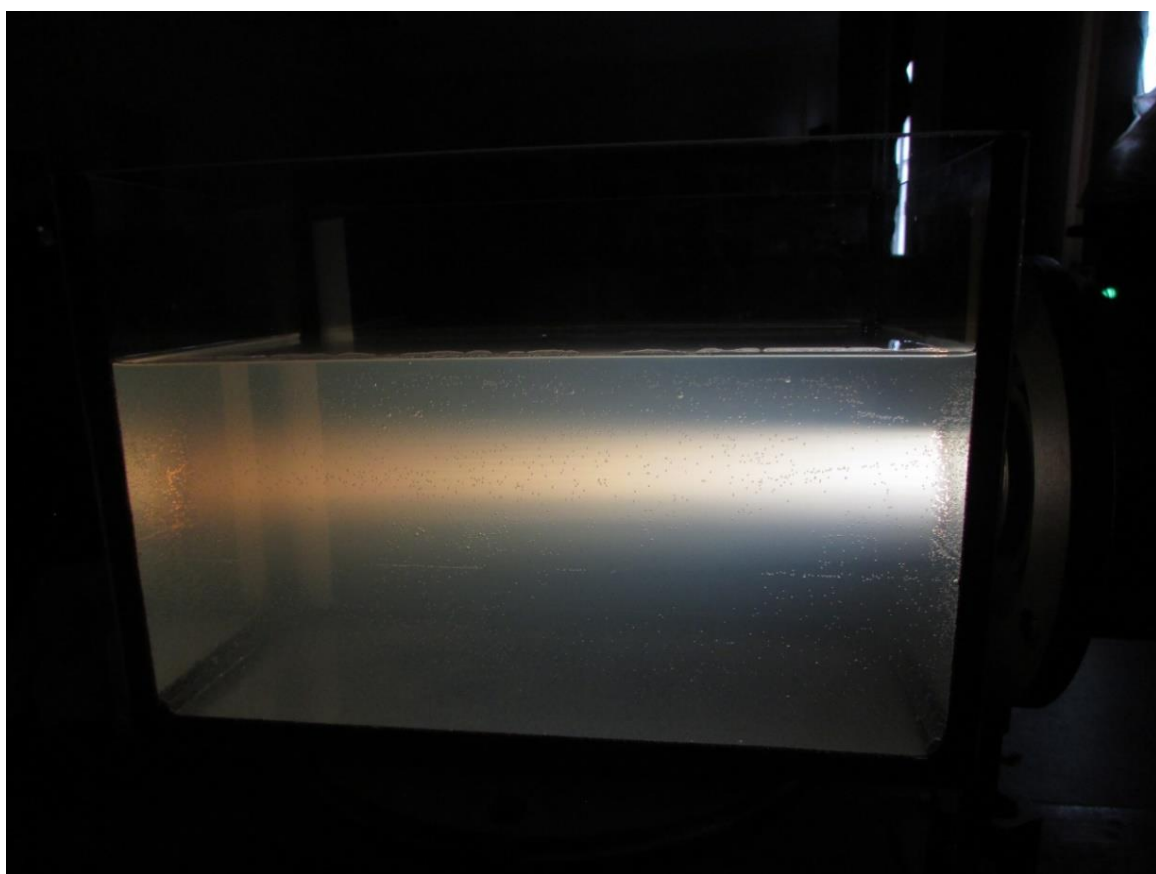


Рис. 16. Рассеянный свет в случае вертикальной поляризации

В случае горизонтальной поляризации (рис. 14 б), рассеянный свет наблюдается в верхнем и нижнем направлениях, а в боковом направлении не наблюдается (рис. 17).

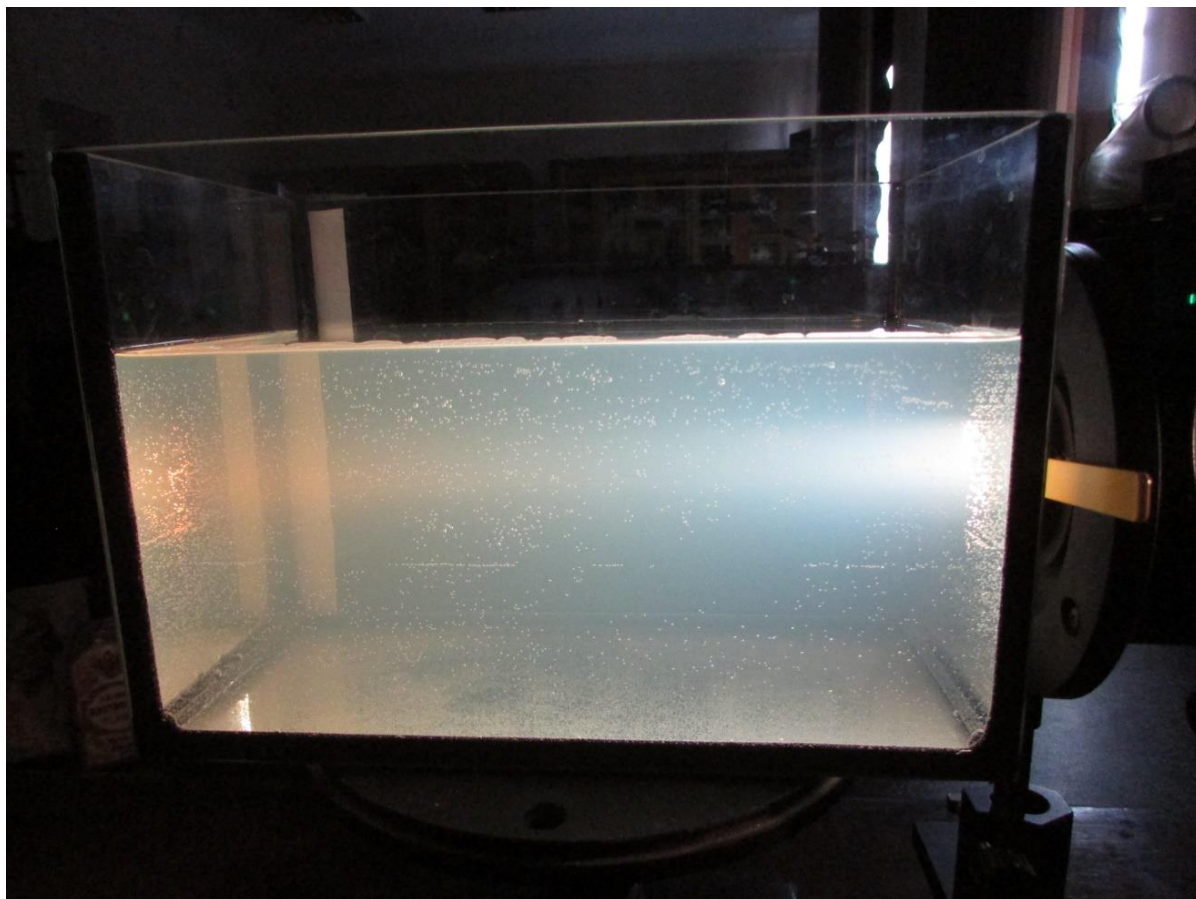


Рис. 17. Рассеянный свет в случае горизонтальной поляризации

Демонстрация №3

Зависимость интенсивности рассеянного света от длины волны

Как было сказано ранее, интенсивность рассеяния зависит от длины волны падающего света. Чем меньше длина волны, тем сильнее происходит рассеяние света и, наоборот, чем больше длина волны, тем рассеяние слабее. Чтобы убедиться в этом рассмотрим следующую демонстрацию.

Схема эксперимента (рис. 18):

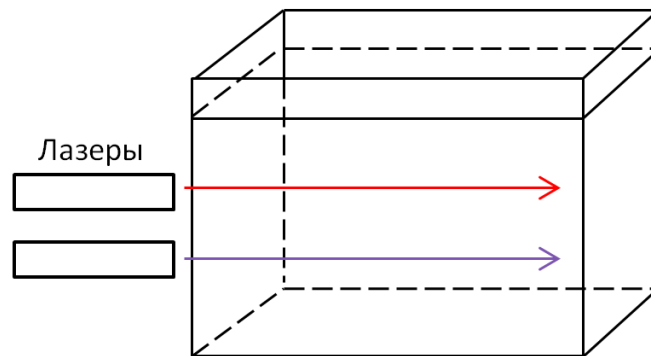


Рис. 18. Схема

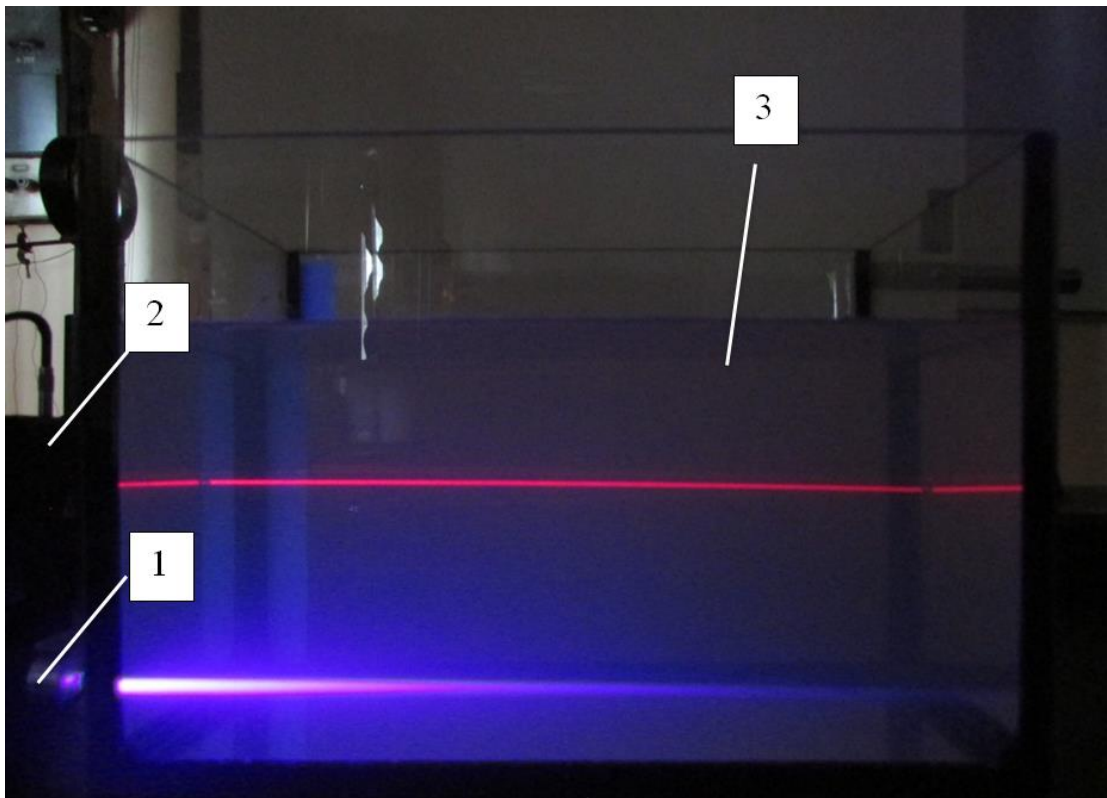


Рис. 19. Экспериментальная установка

Составные части схемы (рис. 19):

- 1) Фиолетовый лазер;
- 2) He-Ne лазер (красный);
- 3) Кювета с мутной средой.

Постановка и объяснение эксперимента:

Есть 2 лазерных пучка нижний – фиолетовый (λ : 440-380нм), верхний - красный (λ : 740-625 нм).

Кювета заполнена водой, здесь уже есть незначительное рассеяние, поэтому мы видим лучи от лазеров (рис. 20).

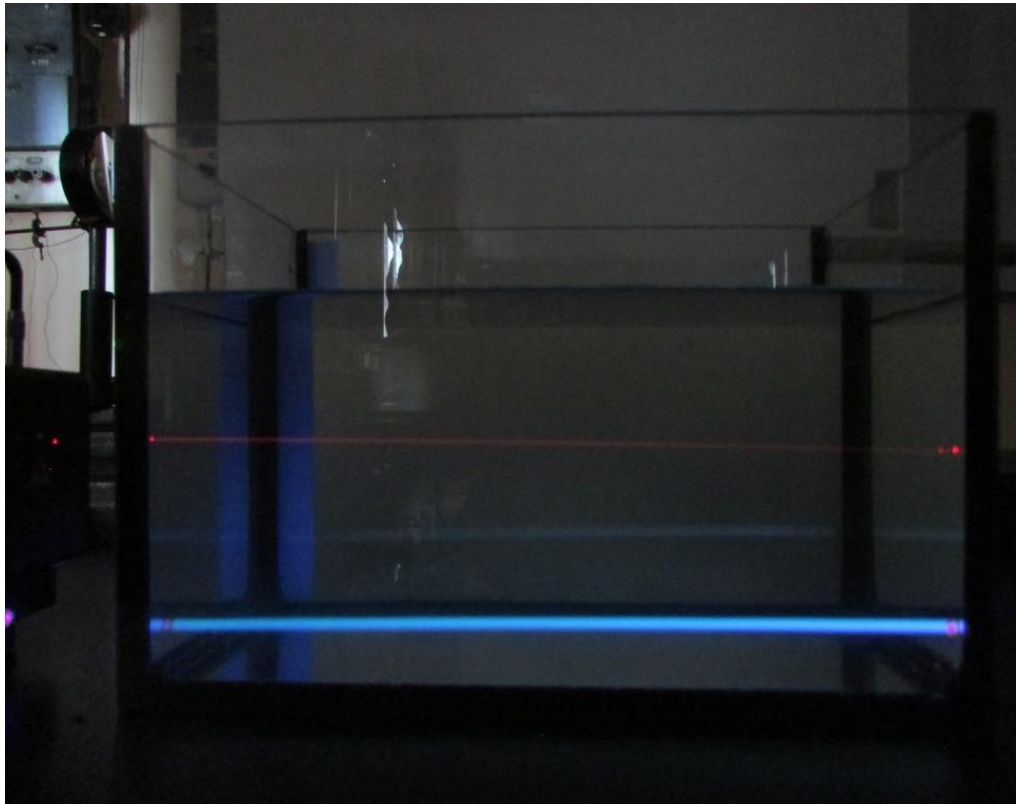


Рис. 20. Лучи лазеров в воде

Усилим оптическую неоднородность, добавив в воду рассеивающие центры. Видно, что фиолетовый луч начинает рассеиваться первым, так как он имеет меньшую длину волны, и этот луч уже не доходит до конца кюветы (рис. 21), т.е. коэффициент рассеяния для этой длины волны стал большой.

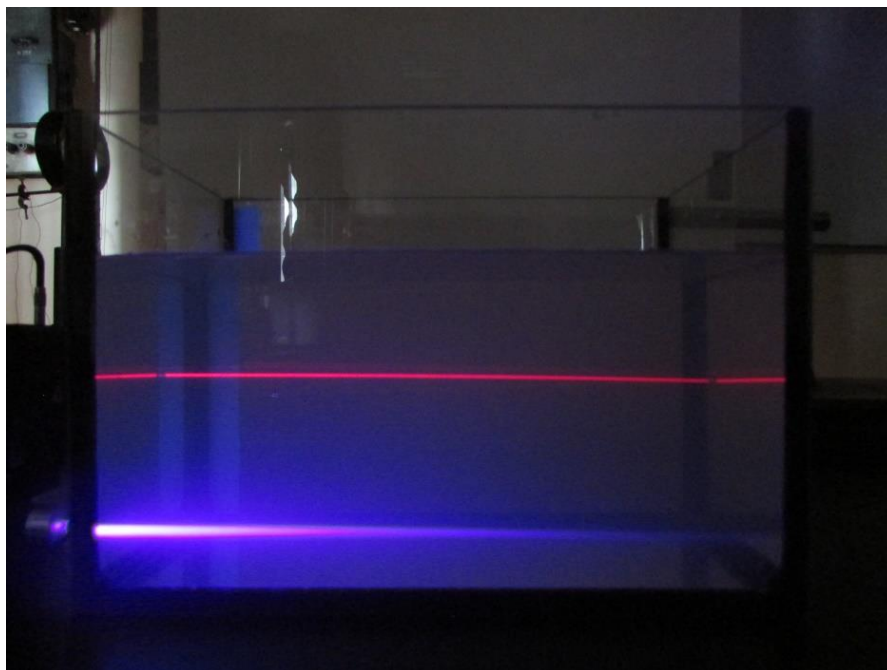


Рис. 21. Лучи лазеров в мутной среде

Добавим ещё рассеивающих центров, видно, что фиолетового луча почти нет, интенсивность красного луча в конце кюветы стала меньше, чем в начале, но красный луч по-прежнему, является менее рассеянным (рис. 22), поскольку имеет большую длину волны.

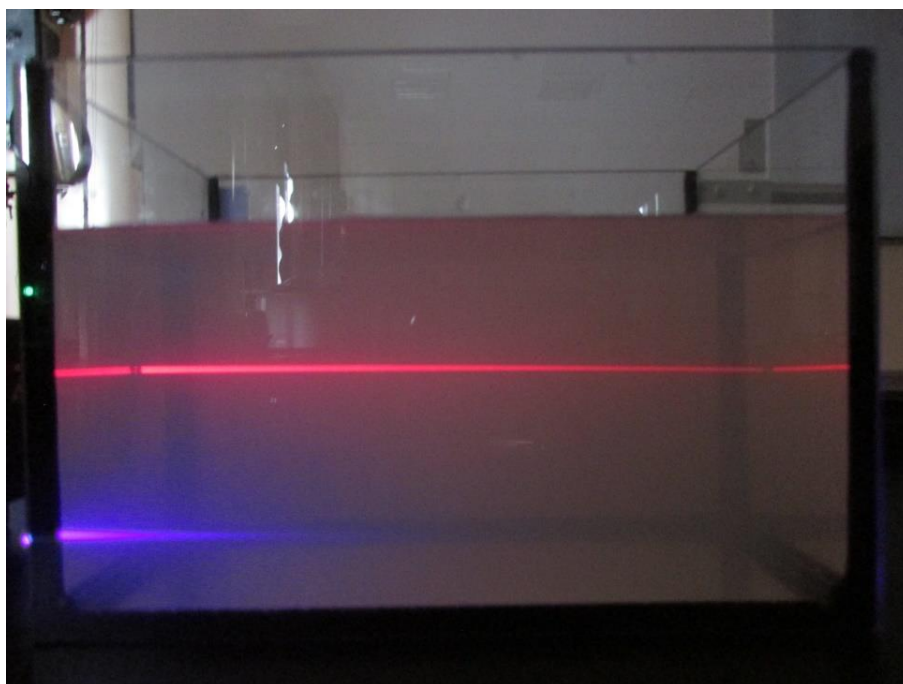


Рис. 22. Лучи лазеров в мутной среде с большей концентрацией рассеивающих центров

В рамках данной работы была разработана лекция – «Рассеяние света» (Приложение 1), которая включает рассмотренные демонстрации.

3.3. Методика постановки лабораторной работы

Разработанную лабораторную работу «Распространение света в мутной среде» (Приложение 2), можно проводить в качестве одной из работ лабораторного практикума по оптике.

Цель работы: наблюдение поглощения и рассеяния света в мутной среде, определение величины ослабления света, прошедшего через мутную среду.

Сначала были подготовлены все необходимые для работы приборы и принадлежности: He-Ne лазер, зеркало, кювету с мутной средой, мультиметр, фотоэлемент, штатив, скамья, большой сосуд, пробирки на 50 и 200 мл, миллиметровка. После подготовили мутную среду, для этого взяли большой сосуд, налили в него 3 л воды и добавили 16 мл одеколona. Для того чтобы было удобно измерять высоту жидкости в кювете, на неё наклеили миллиметровую шкалу. Затем приступили к сборке экспериментальной установки, схема которой представлена на рис. 23.

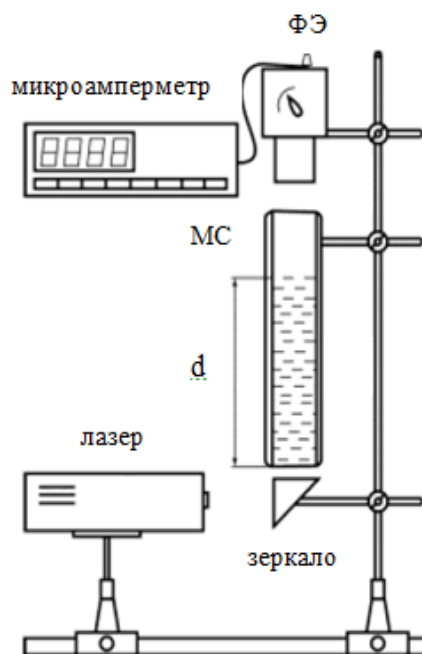


Рис. 23. Схема

На лабораторном столе установили штатив, в нижней части которого закрепили подвижное зеркало. Рядом со штативом расположили скамью, на которую поставили кювету, так, чтобы зеркало оказалось под ней. В верхней части штатива закрепили фотоэлемент, который затем подключили к мультиметру. После этого He-Ne лазер поставили напротив зеркала и включили в сеть. Таким образом, получилась установка, которая представлена на рис. 24.

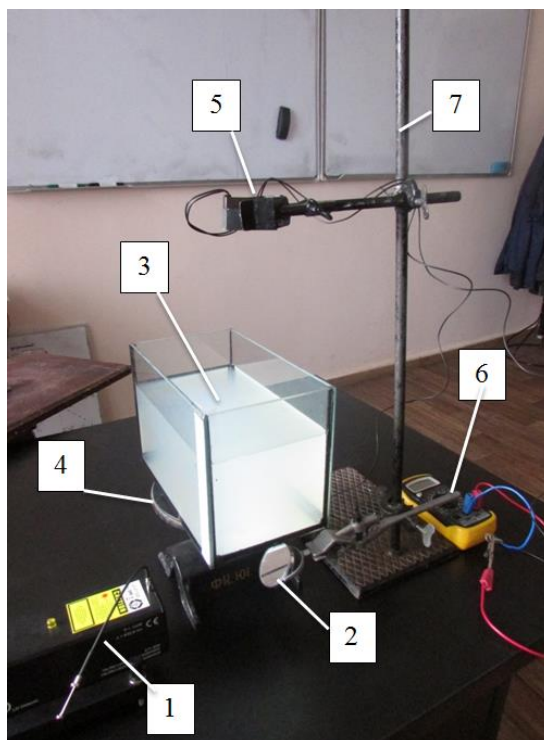


Рис. 24. Экспериментальная установка

Составные части схемы (рис. 24):

- 1) He-Ne лазер;
- 2) Зеркало;
- 3) Кювета с мутной средой;
- 4) Скамья;
- 5) Фотоэлемент;
- 6) Мультиметр;
- 7) Штатив.

Затем была проведена юстировка так, чтобы свет от лазера, пройдя кювету, падал на фотоэлемент. Добившись нужного результата, измерили значение фототока i_0 при прохождении света через пустую кювету и занесли данные в таблицу 1. Затем встряхнули ёмкость с мутной средой и перелили столько жидкость из ёмкости в кювету, чтобы по шкале она дошла до 1 см, снова записали показания мультиметра. Доливая по 1 см жидкости в кювету, определяли значение фототока и записывали в таблицу 1. Таким образом было проведено 10 измерений.

Таблица 1. Экспериментальные данные

d, см	i, мА
0	0,021
1	0,019
2	0,017
3	0,015
4	0,014
5	0,012
6	0,011
7	0,011
8	0,01
9	0,008
10	0,007
$\Delta d = 0,1 \text{ см}$	$\Delta i = 1 \text{ мкА}$

Данные экспериментов после обработки представлены в таблице 2.

Таблица 2. Обработанные экспериментальные данные

d, см	i, мкА	i/i₀	ln(i/i₀)
0	21	1	0
1	19	0,9	-0,1
2	17	0,81	-0,21
3	15	0,71	-0,34
4	14	0,67	-0,4
5	12	0,57	-0,56
6	11	0,52	-0,65
7	11	0,52	-0,65
8	10	0,48	-0,73
9	8	0,38	-0,97
10	7	0,33	-1,11

По полученным данным был построен график зависимости фототока i от высоты столба жидкости d (рис. 25):

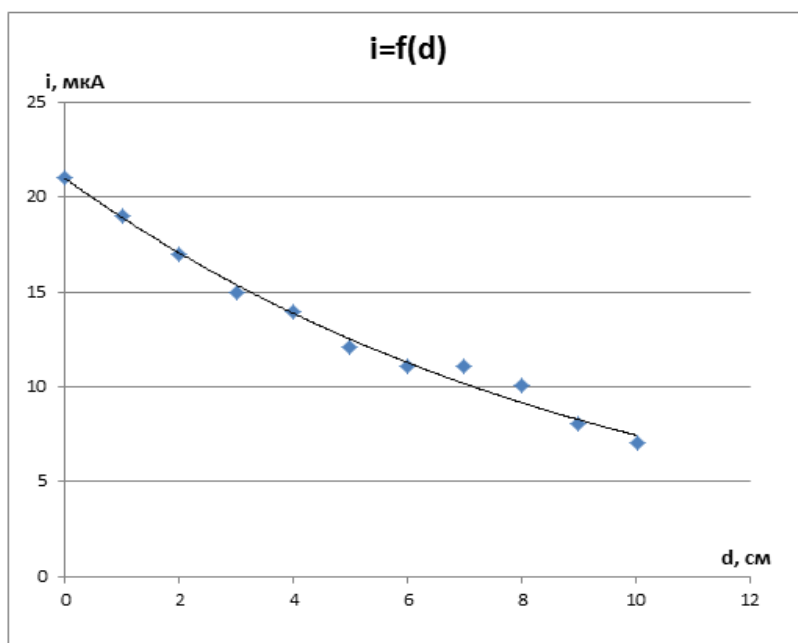


Рис. 25. График зависимости фототока i от высоты столба жидкости d

А так же построен график зависимости $\ln(i/i_0)$ от высоты столба жидкости d (рис. 26):

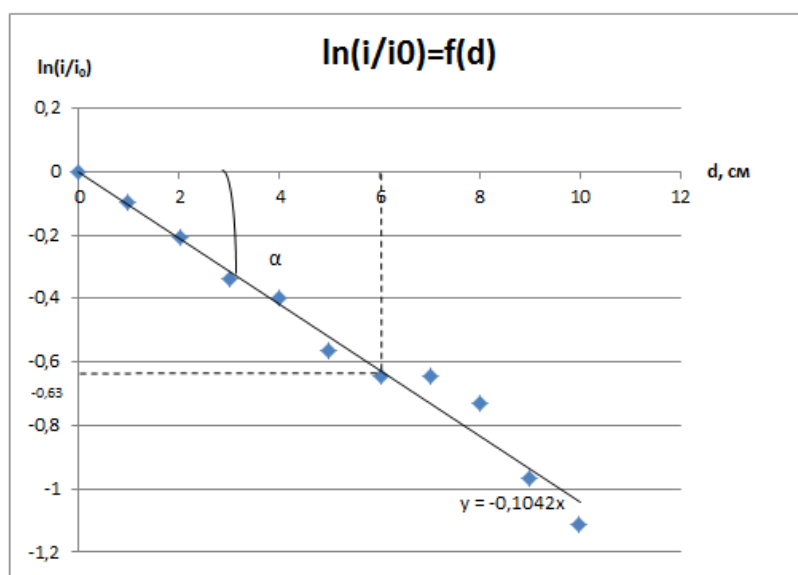


Рис. 26. График зависимости $\ln(i/i_0)$ от высоты столба жидкости d

Для более точного построения второго графика был использован метод наименьших квадратов (МНК), по нему был определён угловой коэффициент, найдено значение $\ln(i/i_0)$ при высоте столба жидкости $d=6$ см. Полученные данные подставили в выражение, позволяющее определить коэффициент ослабления света k :

$$k = tg\alpha = \frac{|\ln(i/i_0)|}{d} = \frac{|-0,63|}{6\text{ см}} = 0,105\text{ см}^{-1} \approx 0,11\text{ см}^{-1}$$

Так же рассчитали статистическую, приборную погрешность и относительную погрешность ε .

Результат: $k = (0,11 \pm 0,03)\text{ см}^{-1}$ при $\varepsilon = 27\%$.

Подробные расчёты представлены в приложении 3.

3.4. Методика постановки домашнего эксперимента

Экспериментальное изучение явления рассеяния света требует особых требований к лабораторным установкам, поэтому в качестве домашнего эксперимента нами был разработан домашний эксперимент, выполненный методом компьютерного моделирования в математическом пакете программ Maple 12 (Приложение 4).

Maple – математический программный пакет, который был разработан компанией Waterloo Maple Inc. Данный пакет программ позволяет производить как простые, так и сложные математические вычисления, служит для визуализации данных и моделирования.

В качестве главных плюсов программы Maple можно выделить:

- 1) Возможность использования бесплатной демоверсии;
- 2) Доступность программы для операционных систем Windows, Linux и macOS.
- 3) Простой и понятный интерфейс программы.

Таким образом, перечисленные достоинства позволяют использовать данную программу в домашних условиях, что является главным требованием домашнего эксперимента.

Интерфейс программы Maple 12 представлен на рис. 27.

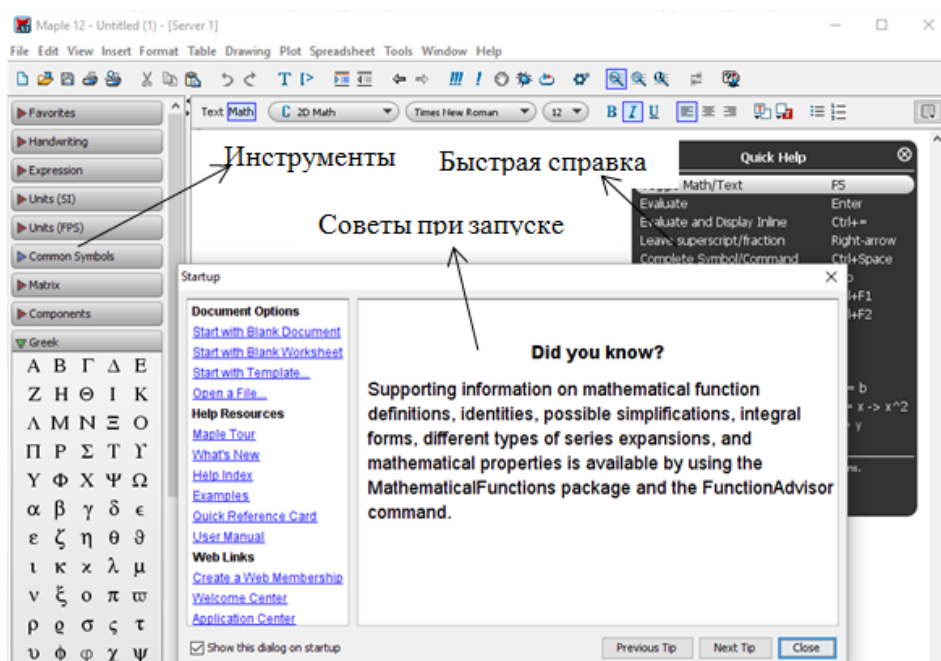


Рис. 27. Интерфейс программы Maple 12

Для того чтобы в рабочее поле можно было записать какую-либо команду (например, математическое выражение), на панели управления нужно выбрать «Math», для ввода текста используется «Text» (рис. 28).

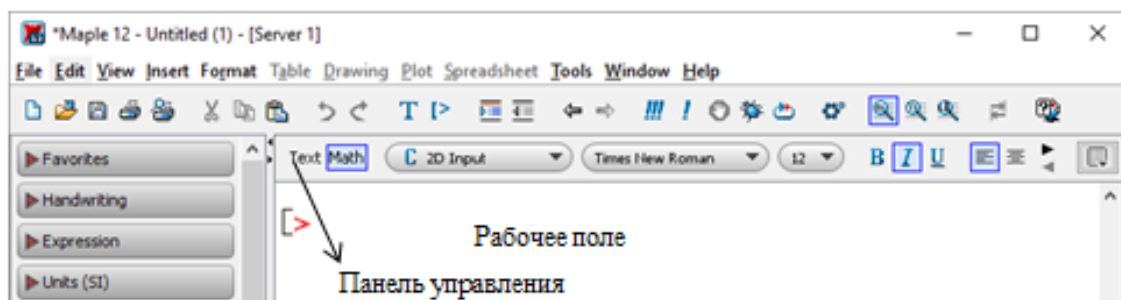


Рис. 28. Панель управления и рабочее поле

Работа в программе осуществляется в форме диалога, пользователь вводит команды, которые передаются на обработку, а Maple выводит их на экран.

В описании к домашнему эксперименту включено знакомство с программой Maple 12, описан интерфейс данной программы, а также даны указания по работе с командами, необходимыми для расчётов. Варианты работы и данные для эксперимента указаны в таблице, которая также включена в описание домашнего эксперимента.

Цель работы: познакомиться с явлением рассеяния света в мутных средах, с помощью компьютерного моделирования изучить его характеристики.

Сначала нами была рассмотрена модель распространения естественного света в мутной среде (рис.29).

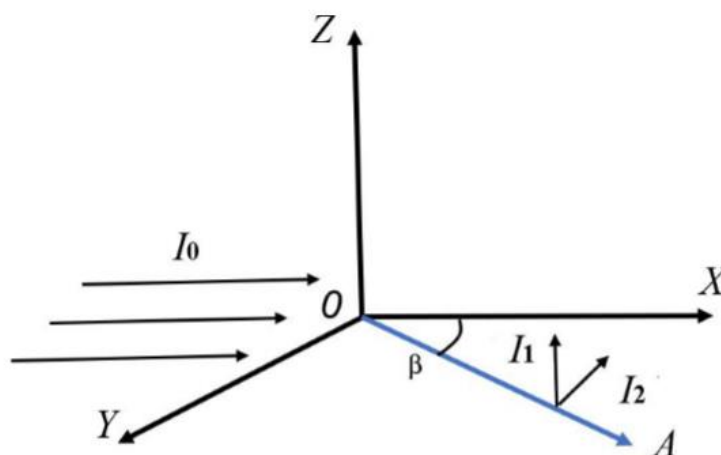


Рис. 29. Схема

Исходя из этой модели, рассеянный свет можно выразить через две составляющие I_1 и I_2 , где I_1 – составляющая, для которой вектор напряженности электрического поля рассеянного света лежит в плоскости перпендикулярной плоскости XOY , а I_2 – составляющая, для которой вектор напряженности электрического поля лежит в плоскости параллельной плоскости XOY . Данные интенсивности можно выразить следующим образом:

$$I_1 = I_0 \frac{9\pi^2 V^2}{\lambda^4 R^2} N \left(\frac{n^2 - k^2}{n^2 + 2k^2} \right) k^4 \frac{1}{2}, \quad (12)$$

$$I_2 = I_0 \frac{9\pi^2 V^2}{\lambda^4 R^2} N \left(\frac{n^2 - k^2}{n^2 + 2k^2} \right) k^4 \frac{\cos^2(\theta)}{2}, \quad (13)$$

где угол θ – угол рассеяния, изменяющийся в пределах от 0° до 360° , n – показатель преломления частицы, k – показатель преломления среды, N – концентрация частиц, V – объём частицы (для сферической частицы $V = \frac{4}{3}\pi r^3$, где r – радиус), R – расстояние от рассеивателя до точки наблюдения.

Суммарная интенсивность рассеянного света будет иметь вид:

$$I = I_1 + I_2 = I_0 \frac{9\pi^2 V^2}{\lambda^4 R^2} N \left(\frac{n^2 - k^2}{n^2 + 2k^2} \right) \frac{k^4}{2} (1 + \cos^2(\theta)). \quad (14)$$

Чтобы приступить к моделированию данного явления, была произведена установка на компьютер программы Maple 12. Обладая навыками работы с данной программой, было продумано, какие задания могут быть осуществлены при помощи программы Maple и какие команды при выполнении этих заданий будут необходимы. Таким образом, для выполнения заданий были использованы три команды: `subs`, `polartplot`, `restart`. А также умение записывать формулы.

В работу были включены три задания. Рассмотрим их выполнение.

Задание №1. Построить индикатрисы рассеяния для двух составляющих интенсивностей рассеянного света и индикатрису рассеяния для суммарной интенсивности рассеянного света в полярной системе координат на одном графике. Вычисления производить для углов, изменяющихся от 0° до 360° , длина волны $\lambda=0,36$ мкм

В Maple величина I – мнимая единица, встроенная константа, которую нельзя переопределить, поэтому сначала привычное обозначение для интенсивности света мы заменили на другую букву (W). С учётом этого формулы 12, 13 и 14 были переписаны:

$$W_1 = W_0 \frac{9\pi^2 V^2}{\lambda^4 R^2} N \left(\frac{n^2 - k^2}{n^2 + 2k^2} \right) k^4 \frac{1}{2}, \quad (15)$$

$$W_2 = W_0 \frac{9\pi^2 V^2}{\lambda^4 R^2} N \left(\frac{n^2 - k^2}{n^2 + 2k^2} \right) k^4 \frac{\cos^2(\theta)}{2}, \quad (16)$$

$$W = W_1 + W_2 = W_0 \frac{9\pi^2 V^2}{\lambda^4 R^2} N \left(\frac{n^2 - k^2}{n^2 + 2k^2} \right) k^4 (1 + \cos^2(\theta)). \quad (17)$$

Чтобы построить индикатрису рассеяния первой составляющей, в области ввода рабочего листа мы записали выражение (15), убедившись первоначально, что включен режим ввода математических формул «Math», в конце выражения поставили символ ';' и нажали клавишу 'Enter'. Далее, используя команду subs (substitute – «подстановка»), в формулу подставили величины, значения которых приведены в таблице 3.

Таблица 3.

Природа частицы и среды	Интенсивность исходного пучка W_0	Размер частицы r , мкм	Показатель преломления частицы n	Показатель преломления среды k	Расстояние до точки наблюдения R , мкм	Концентрация N
вода в воздухе	1	0,025	1,33	1	10^5	10^5

Далее, используя команду polartplot, построили график полученного значения в полярной системе координат (рис. 30). Видно, что WI является постоянной величиной и не зависит от угла, поэтому, в качестве функции берется полученное значение.

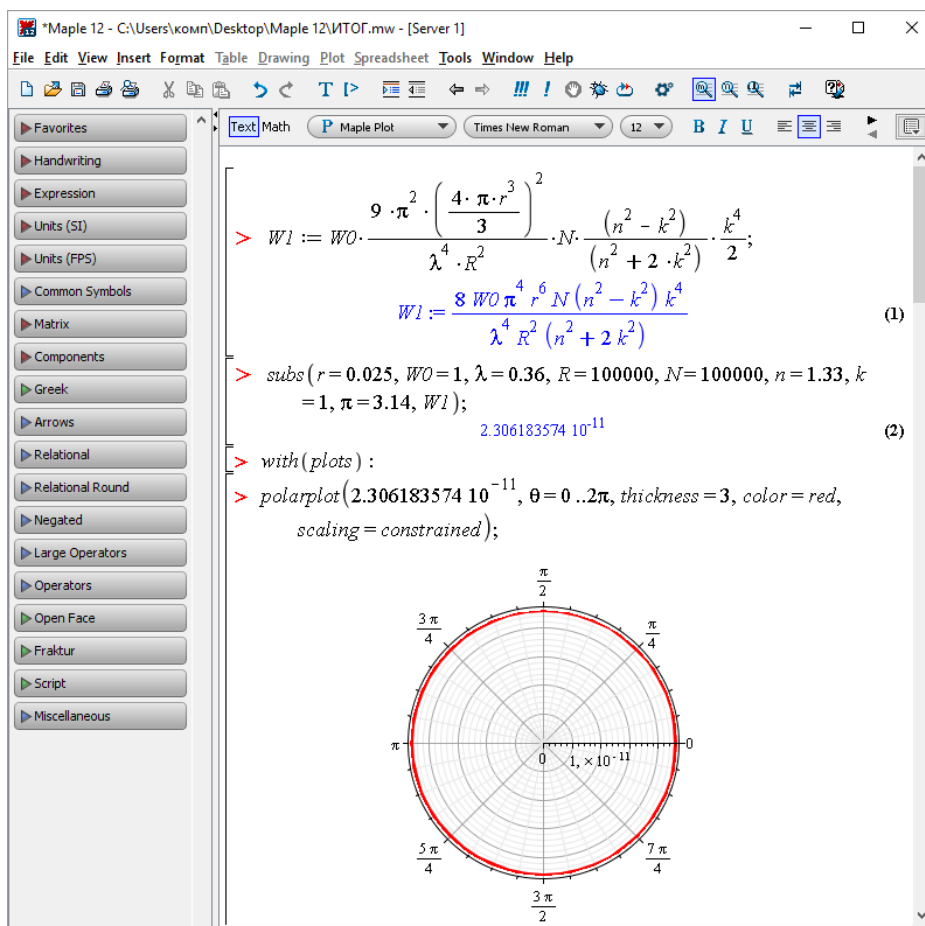


Рис. 30. Индикатриса рассеяния для $W1$

Далее аналогично, построили индикатрису рассеяния для составляющей $W2$ (рис. 31).

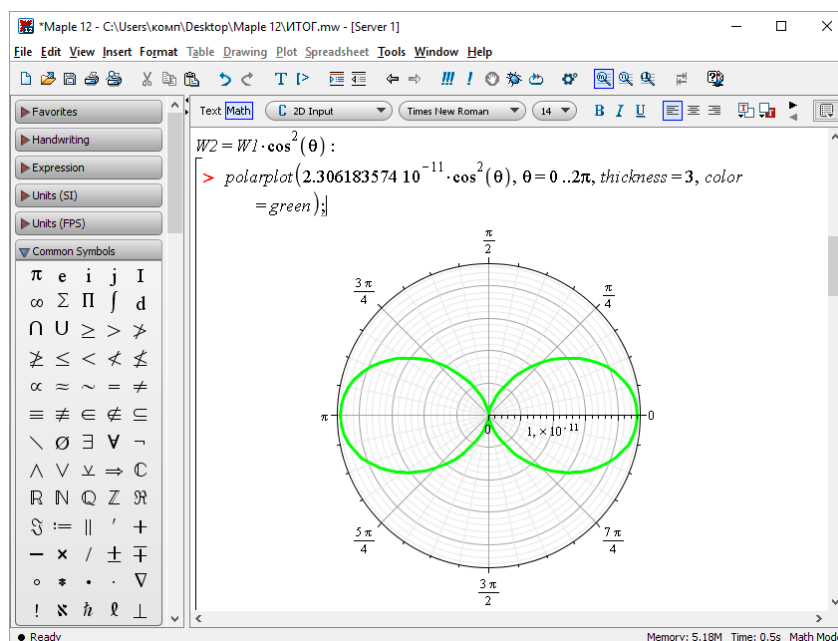


Рис. 31. Индикатриса рассеяния для $W2$

После этого построили обе индикатрисы на одном графике и добавили суммарную индикатрису рассеяния (рис. 32), выражение, для которой представили, как произведение формулы (15) и $(1 + \cos^2(\theta))$.

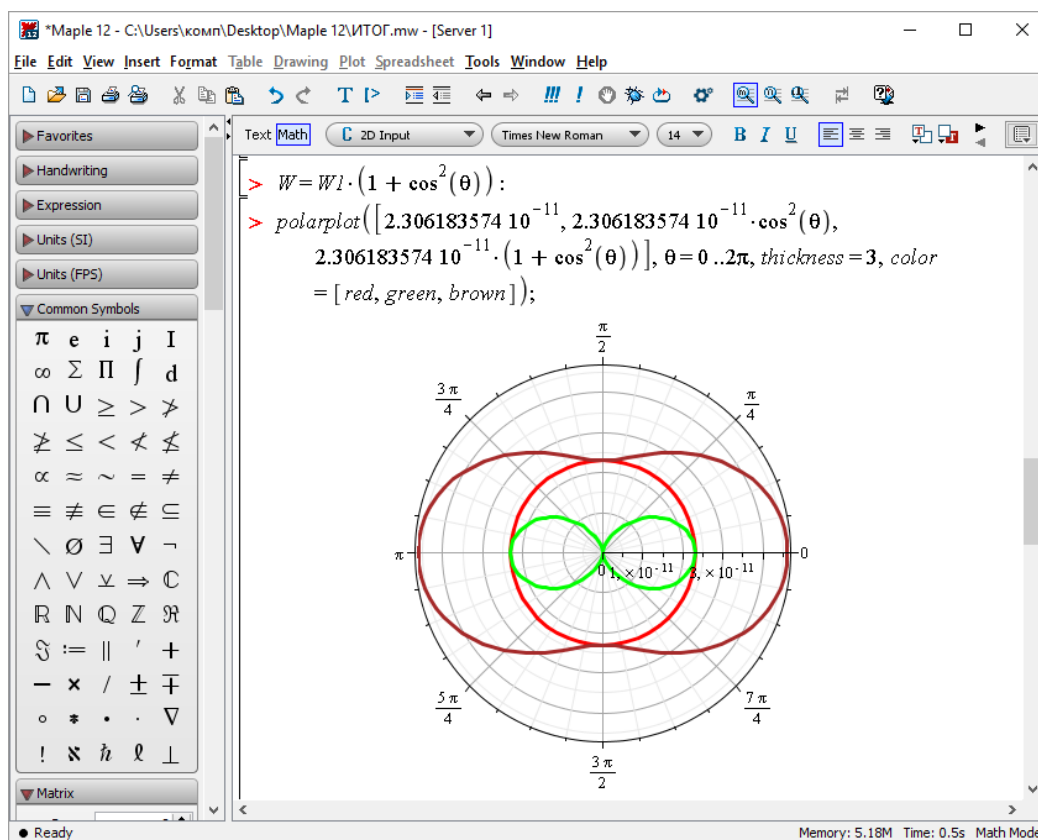


Рис. 32. Индикатриса рассеяния для W

Задание №2. В полярной системе координат на одном графике построить индикатрисы рассеяния для 3-х длин волн: 0.45, 0.53, 0.78 мкм, для углов, изменяющихся от 0° до 360° . Сделать вывод о зависимости индикатрисы рассеяния от длины волны.

Чтобы отменить все сделанные назначения, перед выполнением этого задания применили команду `restart`. Затем ввели формулу (17), подставили в формулу известные данные для разных длин волн. Получили три функции (рис. 33). Для построения графика в список подставляли функции в более удобном виде (вынесли общий член за скобку).

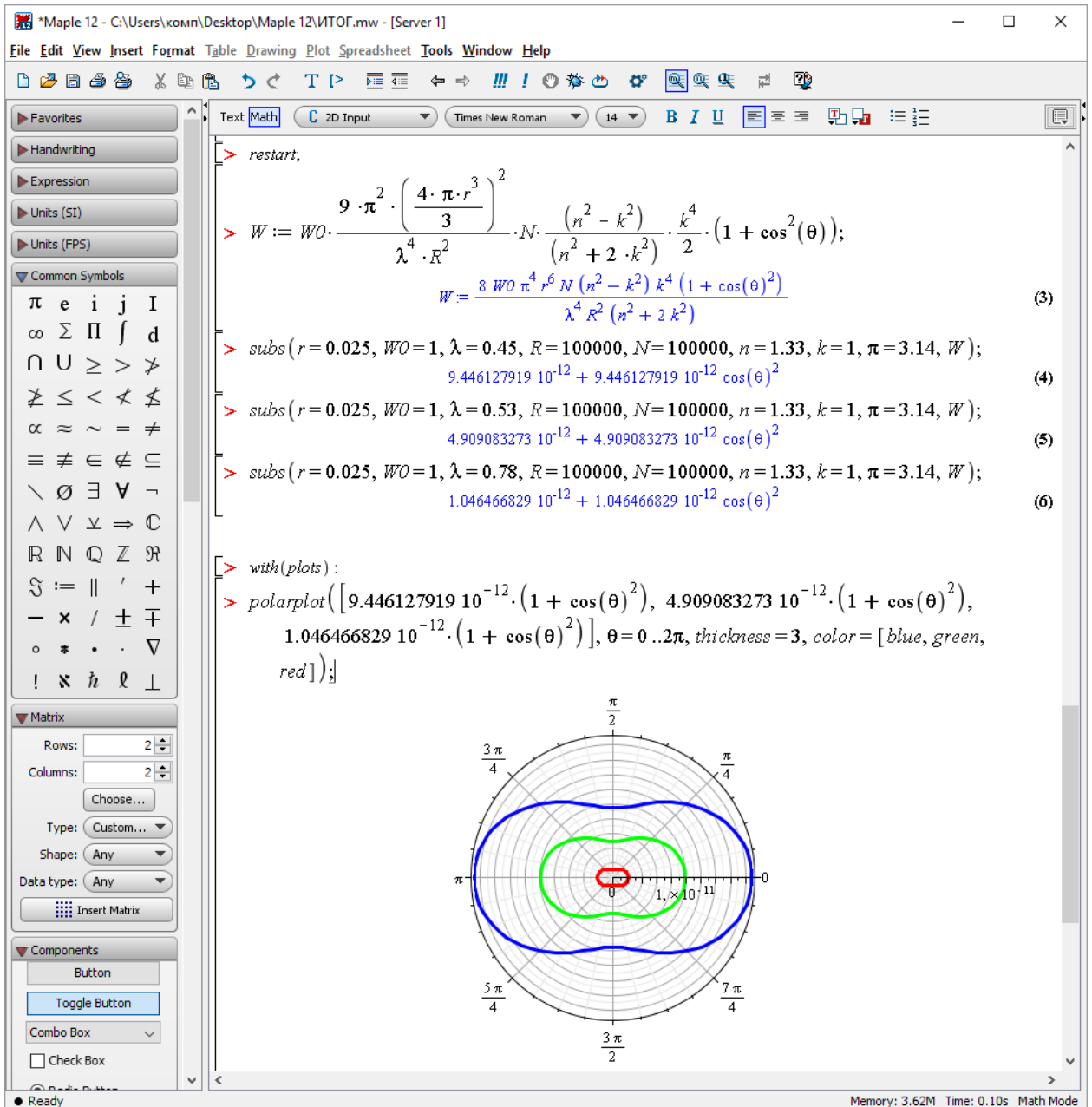


Рис. 33. Индикатриса рассеяния для разных длин волн

Видно, что при увеличении длины волны падающего света интенсивность рассеянного света становится меньше: $I \sim \frac{1}{\lambda^4}$.

Задание №3. Рассчитать суммарную интенсивность W для разных углов : 0° , 45° , 90° Расчёты выполнить для длины волны $\lambda=0,4$ мкм. Сделать вывод о зависимости интенсивности рассеянного света от угла.

Перед выполнением задания применили команду `restart`, записали формулу и подставили значения для трёх разных углов (рис. 34).

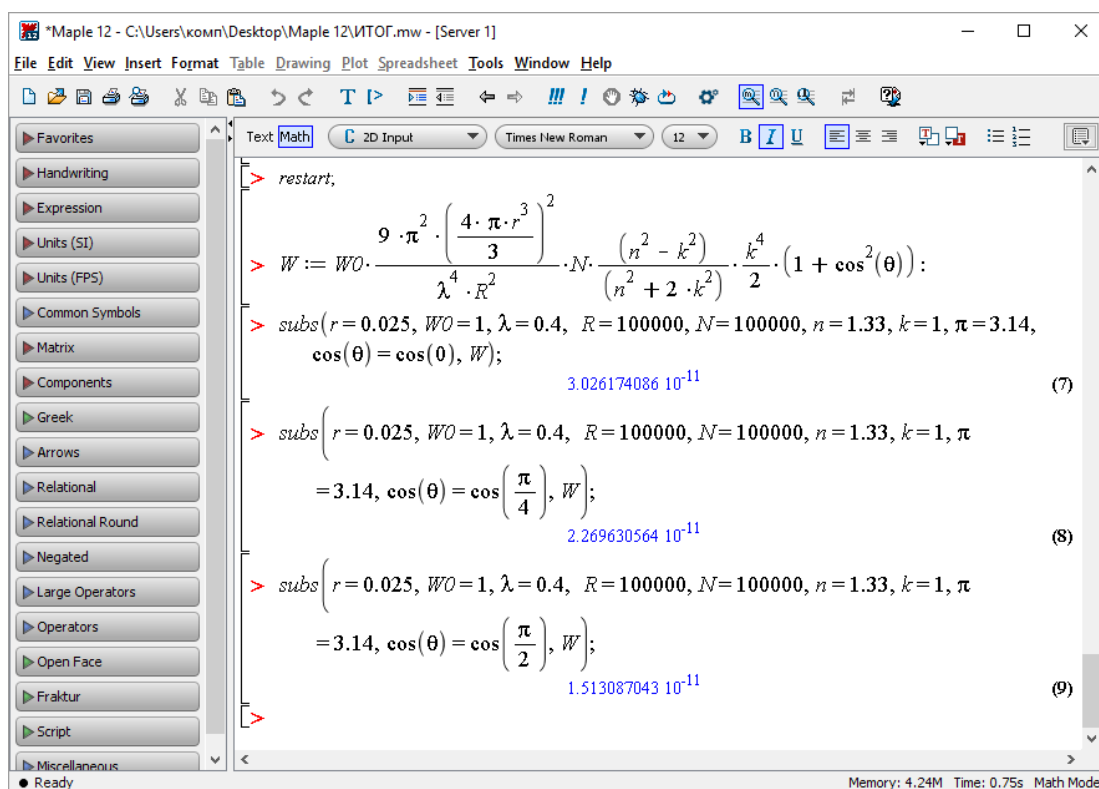


Рис. 34. Значения интенсивностей света при разных углах

В данном опыте получилось, что максимальная интенсивность будет наблюдаться в прямом направлении, т.е. когда $\theta = 0$, а минимальная – под углом $\theta = \frac{\pi}{2}$. Примерный отчёт выполнения домашнего эксперимента представлен в приложении 5.

Разработанный эксперимент, выполненный методом компьютерного моделирования, можно использовать не только как домашний эксперимент, но и как лабораторную работу при дистанционном обучении, что является очень актуальным.

Выполняя данный эксперимент, обучающиеся не только закрепляют знания, полученные при изучении явления рассеяния света, но и знакомятся с математическим пакетом программ Maple 12, таким образом, проявляется метапредметная связь физики и информатики.

Заключение

В ходе проделанной работы была изучена печатная и электронная литература, в которой описывается учебный физический эксперимент и явление рассеяния света. Изучены требования к постановке разных видов учебного эксперимента, цели и задачи. Рассмотрена техника постановки и методика проведения демонстрационного эксперимента, лабораторной работы, домашнего эксперимента. Изучено явление рассеяния света, его механизм, виды и некоторые области применения.

Практически важными являются:

- разработанная система демонстрационного эксперимента по наблюдению явления рассеяния света, которую можно использовать при изучении соответствующей темы в курсе оптики;
- разработанная лекция, включающая демонстрационный эксперимент;
- подготовленная лабораторная работа по изучению явления рассеяния света в мутной среде, которую можно проводить в качестве одной из работ лабораторного практикума по оптике;
- разработанный домашний эксперимент, который осуществляется методом компьютерного моделирования.

В качестве плюсов работы можно отметить, что разработанный домашний эксперимент имеет метапредметную связь с информатикой. Важным является и то, что его можно проводить и как лабораторную работу, при дистанционном обучении. Результаты работы были представлены на Молодёжных научно-практических конференциях (1 места в секции физики 2019 и 2020 г.), а также в конкурсе на лучшую студенческую научную работу в ПсковГУ в номинации «Физико-математические науки» (1 место). Эксперимент, позволяющий наблюдать явление рассеяния света, был продемонстрирован на мероприятии «Ночь науки 2019».

На данном этапе работы поставленные задачи были решены.

Список литературы

1. Теория и методика обучения физике в школе: Общие вопросы [Электронный ресурс]: Учеб. пособие для студ. высш. пед. учеб. заведений / С. Е. Каменецкий, Н. С. Пурышева, Н. Е. Важеевская и др. – Электрон. текстовые данные. – Москва : Издательский центр «Академия» : 2000. – 368 с. – Режим доступа: <http://www.pada-read.com/?book=39897&pg=1>. – Загл. с экрана (дата обращения 20.01.20).
2. Хорошавин С. А. Техника и технология демонстрационного эксперимента [Электронный ресурс] : Пособие для учителей / С. А. Хорошавин. – Электрон. текстовые данные. – Москва : «Просвещение», 1978. – 175 с. – Режим доступа: https://www.studmed.ru/horoshavin-s-a-tehnika-i-tehnologiya-demonstracionnogo-eksperimenta_5a2df88d034.html. – Загл. с экрана (дата обращения 20.02.19).
3. Якута А. А. Состав, цели и задачи учебной дисциплины: основы методики подготовки и проведения лекций, семинарских занятий и практикумов [Электронный ресурс] : Учебное пособие для студентов магистратуры / А. А. Якута. – Электрон. текстовые данные. – Москва : Физический факультет МГУ, 2017. – 98 с. – Режим доступа: http://genphys.phys.msu.ru/rus/mag/2017_Yakuta_GenQMeth1.pdf. – Загл. с экрана (дата обращения 20.04.19).
4. Лабораторные работы по физике [Электронный ресурс] : / Методика обучения физики в средней школе. – Режим доступа: <http://fizmet.org/ru/L10.htm#4>. – Загл. с экрана (дата обращения 11.12.2019).
5. Самостоятельная работа при выполнении учебного эксперимента в лаборатории физики. Методические указания [Электронный ресурс] : / под ред. Н.В. Бакк. – Единое окно доступа к образовательным ресурсам. – Режим доступа:

- <http://window.edu.ru/catalog/pdf2txt/048/37048/14061>. – Загл. с экрана (дата обращения 11.12.2019).
6. Луцай, Е. В. Домашние лабораторные работы по физике в средней школе / Е. В. Луцай // Вестник Псковского государственного университета. Серия " Естественные и физико-математические науки ". – 2014 . – № 4 . – С. 165-168.
 7. Фабелинский И. Л. Открытие комбинационного рассеяния света в России и Индии [Электронный ресурс] / И. Л. Фабелинский // Успехи физических наук. – 2003. – том 173. – №10. – с 1137-1144. – Режим доступа: <https://ufn.ru/ru/articles/2003/10/f/>. – Загл. с экрана (по паролю).
 8. Ландсберг Г. С. Оптика : Учебное пособие для вузов / Г. С. Ландсберг. – Москва : «Наука», 1976. – 928 с.
 9. Гинзбург В. Л. Еще раз к истории открытия комбинационного рассеяния света [Электронный ресурс] / В. Л. Гинзбург, И. Л. Фабелинский. – Режим доступа: https://ufn.ru/tribune/Gin_Fab.pdf. – Загл. с экрана (дата обращения 13.01.20).
 10. Савельев И. В. Курс общей физики : Учебное пособие. В 3-х т. Т.2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – 3-е изд., испр. – Москва: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 496 с.
 11. Рассеяние Ми [Электронный ресурс] : / История развития коллоидной химии. – Режим доступа: <https://sites.google.com/site/kolloidnaahimia/>. – Загл. с экрана (дата обращения 26.02.2020).
 12. Мандельштам – Бриллюэна рассеяние [Электронный ресурс] / К. Н. Драбович / Большая российская энциклопедия. – Режим доступа: <https://bigenc.ru/physics/text/2156743>. – Загл. с экрана (дата обращения 14.02.20).
 13. Спектроскопия комбинационного рассеяния света [Электронный ресурс] Jeol Электронные микроскопы. – Режим доступа: <http://emicroscope.ru/microscopes/microanaliz/raman.html>. – Загл. с экрана (дата обращения 14.02.20).

14. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика: Учеб. Пособие для вузов / В. Е. Гмурман. – 9-е изд., стер. – Москва: Высш. шк., 2003. – 479 с.
15. Демонстрационный эксперимент по физике в средней школе. Часть 2. Электричество. Оптика. Физика атома : Пособие для учителей / под ред. А. А. Покровского. – Изд. 2-е. – Москва : «Просвещение», 1972. – 448 с.
16. Жукова Е. В. Оптическая физика. Методические указания к лабораторному практикуму: Учебно-методическое пособие. – СПб: Университет ИТМО, 2019. – 50 с.
17. Иванова М. С. Наноструктуры : учебное пособие / М. С. Иванова. – Псков : ПГПИ, 2001. – 92 с.
18. Лабораторный практикум по оптике: Учебно-методическое пособие / М. С. Иванова [и др.]; Федерал. агенство по образ. РФ, Псков. гос. пед. ун-т им. С. М. Кирова, каф. физики. – Псков: ПГПУ, 2009. – 116 с.
19. Лабораторный практикум по физике для студентов вечернего факультета МИФИ [Электронный ресурс] / В. В. Грушин [и др.]. – Москва: МИФИ, 2007. – 212 с. – Режим доступа: <http://bookre.org/reader?file=1427778&pg=136> . – Загл. с экрана (дата обращения 22.02.2020).
20. Лекционные демонстрации по физике [Электронный ресурс] : / под ред. В. И. Ивероновой. – Электрон. текстовые данные. – Изд. 2-е. – Москва : «Наука», 1972. – 551 с. – Режим доступа: http://publ.lib.ru/ARCHIVES/G/GRABOVSKIY_Mihail_Aleksandrovich/_Grabovskiy_M.A..html. – Загл. с экрана (дата обращения 15.03.20).

Конспект лекции

Тема лекции: «Рассеяние света».

Цель: Сформировать представление о явлении рассеяния света.

Задачи:

- 1) Рассмотреть механизм рассеяния света;
- 2) Рассмотреть виды рассеяния света;
- 3) Рассмотреть величины характеризующие процесс рассеяния света;
- 4) Экспериментально подтвердить основные закономерности.

Приборы и материалы: оптическая скамья, источник света, диафрагма, линза, экран, поляроид, лазеры (красный и фиолетовый), стеклянная кювета, вода, одеколор.

План лекции:

- 1) Механизм рассеяния света;
- 2) Виды рассеяния света;
- 3) Характеристики рассеяния света;
- 4) Поляризация рассеянного света;
- 5) Демонстрационный эксперимент.

Ход лекции:

1. Механизм рассеяния света.

Пусть имеется пучок света, если наблюдатель находится на пути этого пучка (рис. 1 а), тогда он этот свет увидит, а если смотрит на этот луч света в боковом направлении (рис.1. б), то нет. Если наблюдатель всё же видит свет в боковом направлении, то это означает, что свет, который шёл вправо, изменил направление движения и пошёл в перпендикулярном направлении. Таким образом, это означает, что произошло рассеяние света.

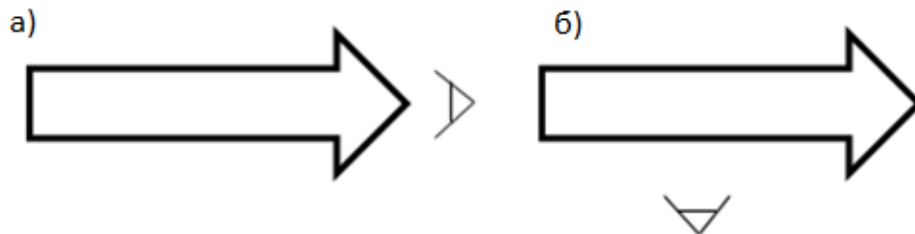


Рис.1.

Данное явление возникает, потому что есть взаимодействие излучения с веществом. Исходя из классических представлений о физике, свет, распространяясь в веществе, вызывает колебания электронов в атомах. Эти электроны, в свою очередь, являются источниками вторичных волн, которые распространяются по всем направлениям. Вторичные волны будут когерентны, поэтому необходимо помнить об их интерференции.

При условии, что показатель преломления среды остаётся постоянным в разных её точках, т.е. среда является оптически однородной, вторичные волны будут гасить друг друга по всем направлениям, кроме того направления, в котором распространялась первичная волна, тогда явления рассеяния света не наблюдается.

В случае, когда среда неоднородна, вторичные волны не будут гасить друг друга по разным направлениям, они дифрагируют на неоднородностях среды и получаемая дифракционная картина характеризуется равномерным

распространением интенсивности по разным направлениям. Эта дифракция на мелких неоднородностях среды получила название рассеяния света.

Таким образом, под рассеянием света будем понимать физическое явление, в ходе которого свет, распространяясь в среде и взаимодействуя с веществом, отклоняется по разным направлениям.

Оптическая неоднородность среды может быть вызвана разными причинами: во-первых, это могут быть включения инородного вещества в исходной среде, во-вторых, это могут быть тепловые флуктуации.

2. Виды рассеяния света.

Классифицируем это явление (рис. 2).

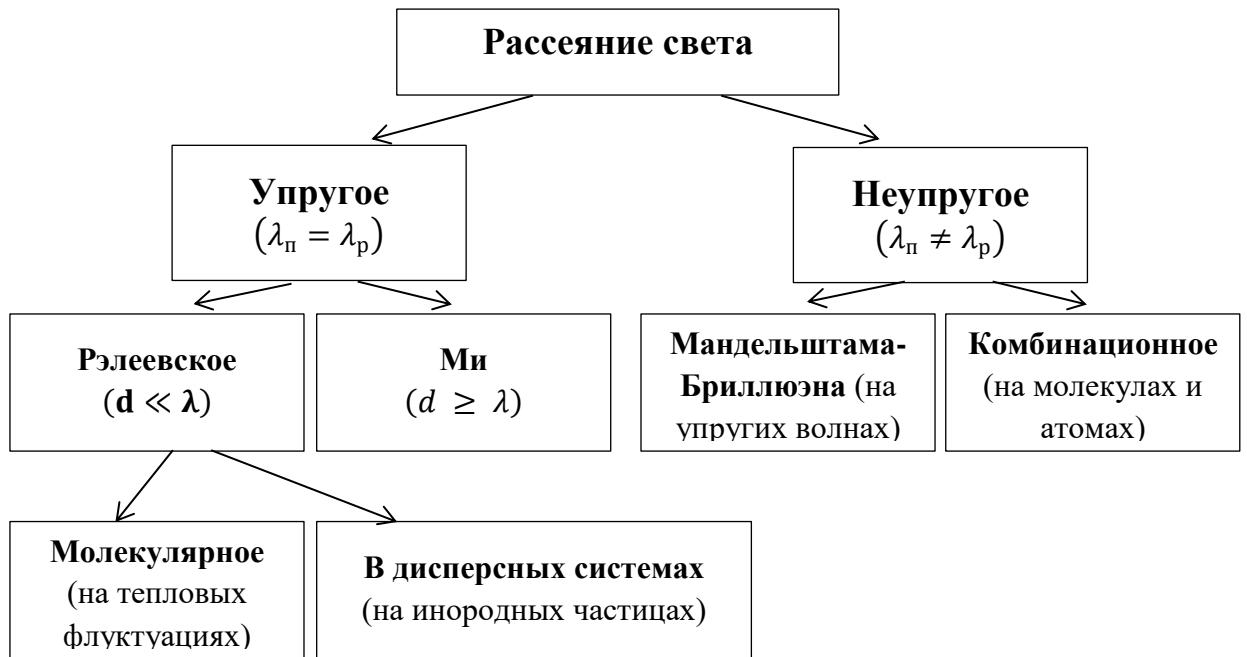


Рис. 2. Классификация рассеяния света

Различают упругое и неупругое рассеяние.

Пусть λ_n – длина волны падающего света, λ_p – длина волны рассеянного света, тогда:

- 3) если $\lambda_n = \lambda_p$, то такое рассеяние называют упругим.
- 4) если $\lambda_n \neq \lambda_p$, то такое рассеяние называют неупругим.

Упругое рассеяние бывает двух видов: рэлеевское и рассеяние Ми. Различие заключается в размерах тех областей неоднородностей, которые являются причиной светорассеяния. Если размеры неоднородностей заметно меньше, чем длина волны то это рэлеевское рассеяние, а если порядка или заметно больше длины волны, то говорят о рассеянии Ми.

Рэлеевское рассеяние, в свою очередь, можно разделить на два вида. Если причиной оптических неоднородностей среды, на которых рассеивается свет, являются флуктуации плотности, то такое рассеяние называют молекулярным. Если же неоднородность среды вызвана включением в неё инородных частиц, то такое рассеяние называют рассеянием в дисперсных системах.

Что касается неупругого рассеяния, то различают два основных вида: рассеяние Мандельштама – Бриллюэна и комбинационное рассеяние.

Рассеяние Мандельштама – Бриллюэна – это тоже рассеяние на флуктуациях, но флуктуациях, которые коррелированы в пространстве, эти флуктуации можно представить, как совокупность распространяющихся упругих волн в среде, а значит, изменение плотности, следовательно, изменение оптических свойств. Таким образом, рассеяние на упругих волнах это и есть рассеяние Мандельштама – Бриллюэна.

Комбинационное рассеяние – рассеяние на молекулах и атомах. Основная причина такого рассеяния заключается в том, что молекулы и атомы могут находиться в возбуждённом состоянии или в основном, и, в зависимости от этого, при рассеянии соответствующей волны они могут либо принимать часть энергии волны, а другую часть рассеивать, тогда частота будет меньше. Или, наоборот, находясь в возбуждённом состоянии, могут эту энергию добавить к энергии падающей волны, а тогда будет рассеяна волна с большей частотой.

Если оптические неоднородности среды носят явный характер, такие среды называют мутными. Мутными средами являются: дым – взвесь мельчайших твердых частиц в газе; туман – взвесь в газах капель жидкости; суспензии – твёрдые частички в жидкости; эмульсии – капельки одной жидкости

в другой. К мутным средам относятся и некоторые твёрдые тела, такие, как: опалы, перламутр, молочное стекло и другие.

3. Характеристики рассеяния света.

Рассмотрим физические величины, которые характеризуют процесс рассеяния света.

Индикатриса рассеяния – кривая зависимости интенсивности рассеянного света I от телесного угла Ω : $I(r, \Omega)$.

Рассмотрим рис. 3.

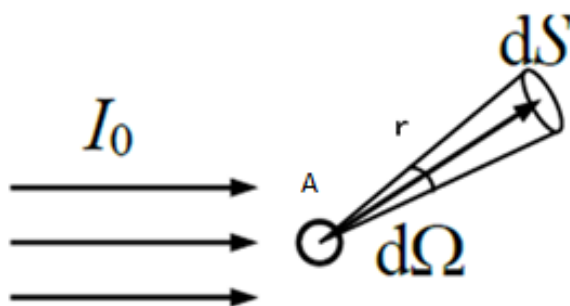


Рис. 3. Индикатриса рассеяния

Пусть A – это рассеиватель. На него падает свет с интенсивностью I_0 . Будем регистрировать в некотором направлении на расстоянии r пучок рассеянного света, такой, что соответствующая площадь на этом расстоянии равна dS , а телесный угол $d\Omega$. Будем считать, что этот угол бесконечно-малый. В этом случае вводятся следующие величины:

Дифференциальное сечение рассеивания $d\sigma$ – отношение потока рассеянного света dJ в малом телесном угле к интенсивности падающего света:

$$d\sigma = \frac{dJ}{I_0} = \frac{I(r, \Omega)dS}{I_0};$$

$$d\Omega = \frac{dS}{r^2} \cos\varphi \Rightarrow dS = d\Omega r^2 \Rightarrow$$

$$d\sigma = \frac{I(r, \Omega)r^2 d\Omega}{I_0}, [d\sigma] = m^2; \quad (1)$$

Полное сечение рассеяния σ – полный поток энергии рассеянного света к интенсивности падающего света. Полный поток – это интеграл по некоторой замкнутой произвольной поверхности, которая охватывает этот рассеиватель, в том числе поверхность, которая находится на расстоянии r от плотности потока рассеянного света.

$$\sigma = \frac{J}{I_0} = \frac{\oint I(r, \Omega)r^2 d\Omega}{I_0}; \quad (2)$$

Внесём в формуле (2) I_0 под знак интеграла, получим:

$$\sigma = \oint d\sigma, [\sigma] = m^2; \quad (3)$$

Известно, что свет, проходя через вещество, теряет часть своей энергии, т.е. эта энергия поглощается веществом. В результате интенсивность света, при прохождении им вещества, становится меньше. Пусть свет проходит сквозь прозрачный слой толщиной d (рис. 4):

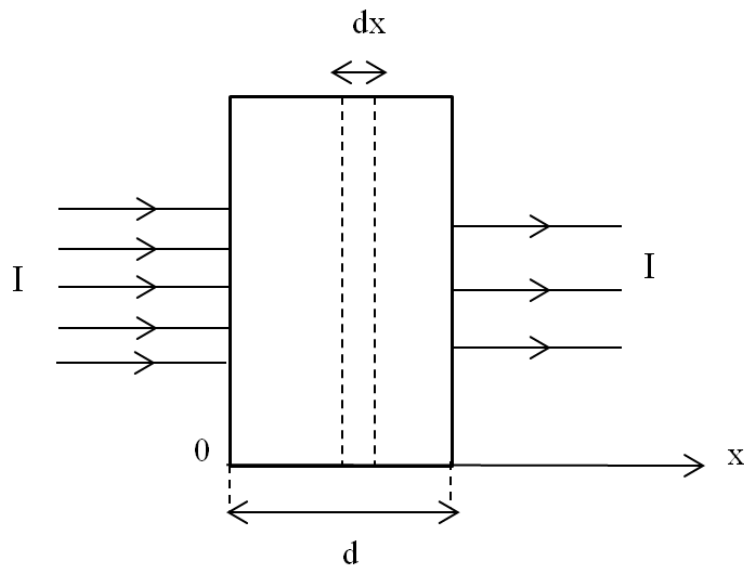


Рис. 4. Прохождение светом прозрачного слоя толщиной d

Пусть I_0 – интенсивность, которую имеет падающий свет, I – интенсивность света, прошедшего через слой. Т.к. слой поглотил часть света, то $I < I_0$.

Из этого слоя выберем бесконечно тонкий слой толщиной dx . Изменение интенсивности будет прямо пропорционально толщине слоя и интенсивности падающего света.

$$dI = -\chi I_0 dx, \quad (4)$$

где χ – коэффициент пропорциональности, независящий от интенсивности света. Знак « $-$ » в выражении показывает, что при увеличении толщины слоя интенсивность света становится меньше.

Преобразуем выражение (4), разделив правую и левую часть на I_0 , получим:

$$\frac{dI}{I_0} = -\chi dx. \quad (5)$$

Проинтегрируем выражение (5):

$$\begin{aligned} \int_{I_0}^I \frac{dI}{I_0} &= -\chi \int_0^d dx \\ \ln I - \ln I_0 &= -\chi d \\ \ln \frac{I}{I_0} &= -\chi d \\ \frac{I}{I_0} &= e^{-\chi d} \\ I &= I_0 e^{-\chi d}. \end{aligned} \quad (6)$$

Полученное выражение (6) носит название закона Бугера. Из закона видно, что проходя через вещество, интенсивность света убывает по экспоненциальному закону.

Коэффициент χ называется коэффициентом поглощения, он зависит от свойств вещества.

Проходя через оптически неоднородную среду, свет будет не только поглощаться веществом, но и рассеиваться. Вследствие светорассеяния интенсивность света в направлении распространения будет убывать быстрее, чем только при одном поглощении. Поэтому в законе Бугера появится ещё один коэффициент – χ' – коэффициент экстинкции, а сам закон примет вид:

$$I = I_0 e^{-(\chi + \chi')d}. \quad (7)$$

Рассмотрим, каким образом излучает некий элементарный рассеиватель, на который падает исходная волна. Пусть волна будет линейно поляризована – это означает, что вектор напряжённости электрического поля E_0 не меняет в пространстве со временем своей ориентации, и он направлен перпендикулярно по отношению к нормали падающего света. Будем рассматривать всё это в вакууме (рис. 5).

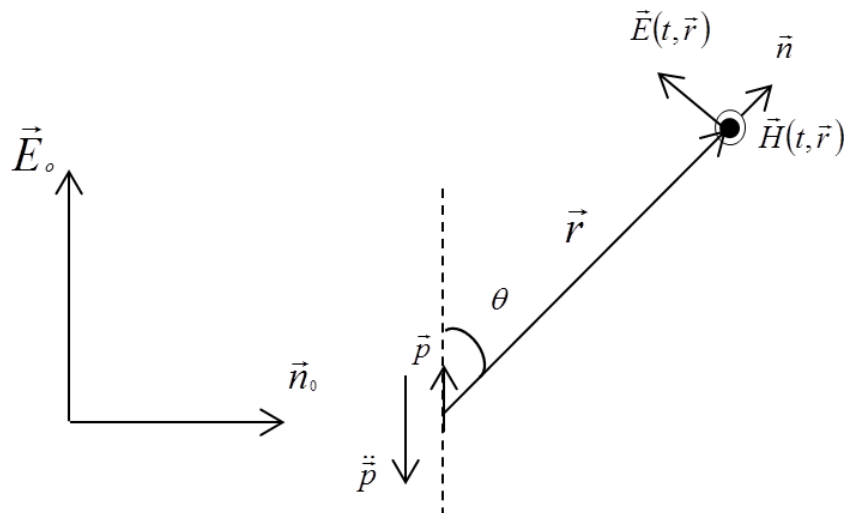


Рис. 5. Излучение элементарного рассеивателя

Рассмотрим систему зарядов, которая не является полярной (т.е. не обладает электрическим дипольным моментом до того как воздействовало электрическое поле этой волны). Но если электрическое поле воздействует, это означает, что произошло относительно друг друга смещение зарядов, возникает электрический дипольный момент, который будет направлен так

же, как напряжённость электрического поля. Этот электрический дипольный момент равен $\vec{p} = q\vec{l}$, где q – заряд, который сместился, \vec{l} – величина, указывающая направление и степень смещения зарядов друг относительно друга.

Рассмотрим случай, когда $l \ll \lambda$. Нас будет интересовать напряжённость электрического и магнитного полей в точке, положение которой задаётся радиус вектором \vec{r} относительно элементарного рассеивателя, единичный вектор, указывающий направление распространения этой рассеянной волны, обозначим как \vec{n} .

Будем считать, что $r \gg l$. Воспользуемся системой уравнений Максвелла:

$$\vec{H}(t, \vec{r}) = -\frac{1}{4\pi cr} \left[\vec{n} \cdot \ddot{\vec{p}} \left(t - \frac{r}{c} \right) \right] \quad (8)$$

где c – скорость света, $\ddot{\vec{p}}$ – вторая производная по времени от вектора поляризации, $\frac{r}{c}$ – небольшое запаздывание за счёт времени распространения волны от излучателя до точки наблюдения.

Найдём то же самое для напряжённости электрического поля, для этого воспользуемся соотношением:

$$\text{rot} \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \Rightarrow,$$

$$[\vec{n} \cdot \vec{H}] = -v \vec{D} \Rightarrow \vec{D} = -\frac{1}{v} [\vec{n} \cdot \vec{H}]$$

для вакуума

$$\vec{D} = -\frac{1}{c} [\vec{n} \cdot \vec{H}] = \varepsilon_0 \vec{E},$$

тогда

$$\vec{E}(t, \vec{r}) = -\frac{[\vec{n} \cdot \vec{H}]}{c\epsilon_0}. \quad (9)$$

Подставляя формулу (8) в (9), получим:

$$\vec{E}(t, \vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 c^2 r} [\vec{n} [\vec{n} \cdot \ddot{\vec{p}}(t - r/c)]] \quad (10)$$

Будем считать, что излучение такое, что для него характерны гармонические изменения напряжённости электрического поля, тогда вектор дипольного момента будет изменяться по гармоническому закону с частотой падающей волны ω : $\vec{p} = \vec{p}_0 \cos(\omega t)$, тогда

$$\ddot{\vec{p}} = -\omega^2 \vec{p}_0 \quad (11)$$

Таким образом, вторая производная электрического дипольного момента направлена в противоположную сторону самому электрическому дипольному моменту.

Введём для определённости угол θ между направлением радиус вектора на точку наблюдения и направлением дипольного момента, посмотрим на формулы для напряжённости полей и тогда увидим, что $\vec{H}(t, \vec{r})$ направлен на нас, а $\vec{E}(t, \vec{r})$ перпендикулярен как \vec{n} , так и $\vec{H}(t, \vec{r})$ в любой момент времени в любой точке.

Вывод, напряжённость электрического поля \vec{E} всегда лежит в плоскости, которая образована напряжённостью электрического поля падающей волны \vec{E}_0 и вектора нормали \vec{n} волны рассеянной: $\vec{E} \parallel (\vec{E}_0, \vec{n})$.

Найдём интенсивность рассеянной волны:

$$I(\vec{r}) = \langle E^2(t) \rangle, \quad (12)$$

т.е. это среднее значение от квадрата напряжённости электрического поля.

Найдём, чему равняется проекция напряжённости электрического поля на локальную ось, которая будет перпендикулярна \vec{n} и \vec{H} :

$$E(t, \vec{r}) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 c^2 r} \ddot{p}(t) \sin \theta. \quad (13)$$

Подставим в формулу (12) выражение для напряжённости электрического поля (13), получим:

$$I(\vec{r}) = \frac{1}{(4\pi\epsilon_0 c^2 r)^2} \overline{\ddot{p}^2} \sin^2 \theta, \quad (14)$$

с учётом формулы (11), получим:

$$I(\vec{r}) = \frac{\omega^4}{(4\pi\epsilon_0 c^2 r)^2} \overline{p^2} \sin^2 \theta. \quad (15)$$

Заметим некоторые особенности, которые связаны с характером рассеяния этим элементарным рассеивателем:

- 1) $I \sim \omega^4$ – закон Рэлея;
- 2) $I \sim \frac{1}{r^2}$;
- 3) I зависит от $\sin^2(\theta)$, что позволяет построить индикатрису рассеяния.

4. Поляризация рассеянного света.

Пусть падающий свет линейно-поляризован, распространяется слева направо, и у нас есть рассеиватель. Ось OZ возьмём вдоль вектора \vec{n}_0 , вторую ось OX направим вдоль вектора \vec{E}_0 , тогда можно построить пространственную диаграмму для интенсивности рассеянного света, как функцию соответствующего угла θ (рис. 6).

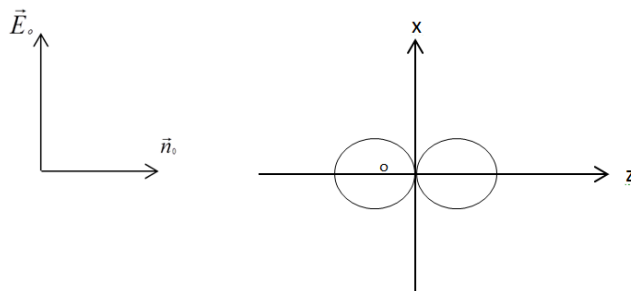


Рис. 6. Индикатриса рассеяния для линейно-поляризованного света

Получается, если волна линейно-поляризованная, то и рассеянная тоже будет линейно-поляризована, но поляризация такая, что она наблюдается только в определённой плоскости и перпендикулярна направлению рассеянного света.

Рассмотрим случай, когда освещаем рассеиватель естественным светом (рис. 7). Тогда естественный свет можно представить, как суперпозицию двух составляющих \vec{E}_{ox} и \vec{E}_{oy} (эти две составляющие не являются когерентными). Подумаем, что же в этом случае будет представлять собой индикатриса рассеяния. Диаграмму части, которая соответствует ориентации вдоль оси X , изобразим синим цветом, интенсивность в случае поляризации вдоль оси X будет равна I_{ox} . Диаграмму части рассеянного света, которая соответствует ориентации напряжённости электрического поля вдоль оси Y , изобразим красным цветом, интенсивность в случае поляризации вдоль оси Y будет равна I_{oy} .

Для того чтобы найти диаграмму белого света необходимо сложить диаграммы. Суммарная интенсивность всего рассеянного света будет равна I .

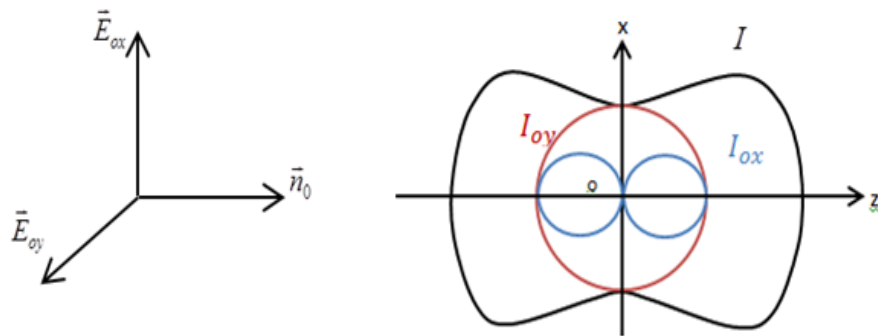


Рис. 7. Индикатриса рассеяния для естественного света

5. Демонстрационный эксперимент.

Для того чтобы лучше понять явление рассеяния света посмотрим несколько демонстраций.

Опыт №1. Наблюдение рэлеевского рассеяния света.

Первая демонстрация поможет наблюдать Рэлеевское рассеяние.

Схема (рис. 8):

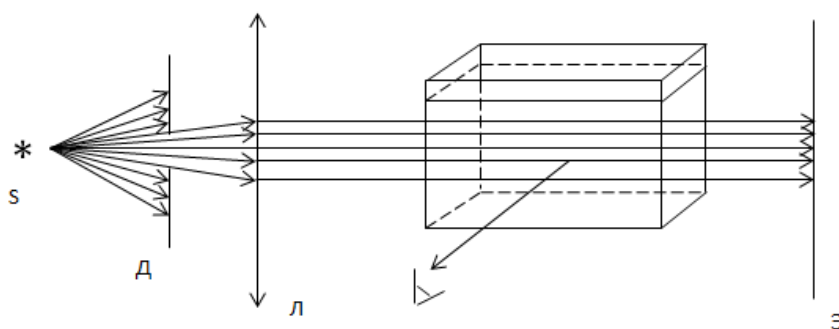


Рис. 8. Схема

Установка выполнена на оптической скамье, в качестве исходной среды используется вода, налитая в кювету (рис.9).

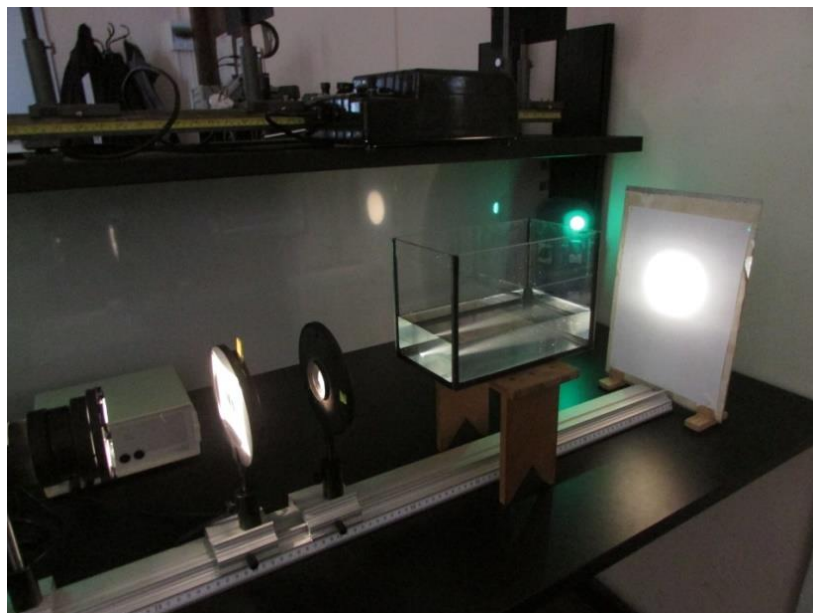


Рис.9. Экспериментальная установка

Луч света входит в кювету с водой, т.к. среда оптически однородная, то сбоку луч света не виден, а свет, выходящий на экран, кажется белым, т.е. там присутствуют и синие и красные компоненты спектра (рис.10).

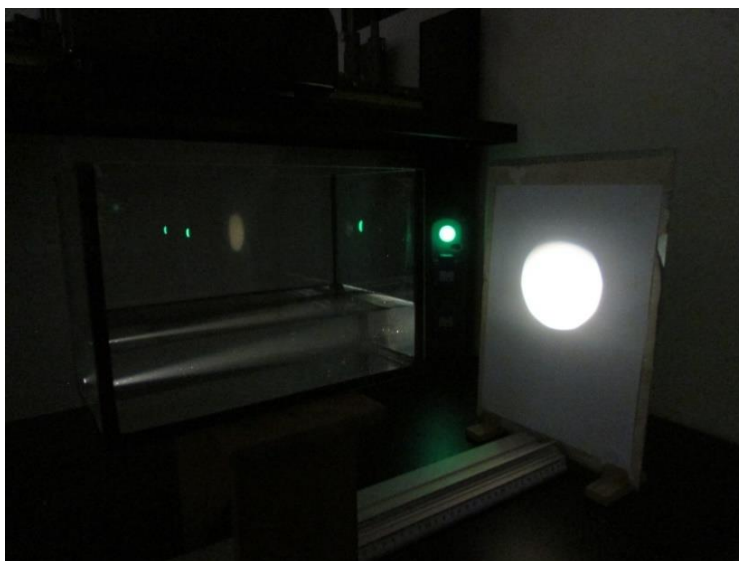


Рис.10. Прохождение света через оптически однородную среду

Для того чтобы получить рассеивающую среду добавим в неё рассеивающие центры. В качестве рассеивателя использовали одеколон.

В результате среда станет оптически неоднородной и будет рассеивать свет.

Видно, что на начальном этапе свет кажется голубоватым, а чем дальше он проходит, тем более желтоватый оттенок он приобретает, а на экране видим пятно с ярко-выраженным желтоватым оттенком (рис. 11).

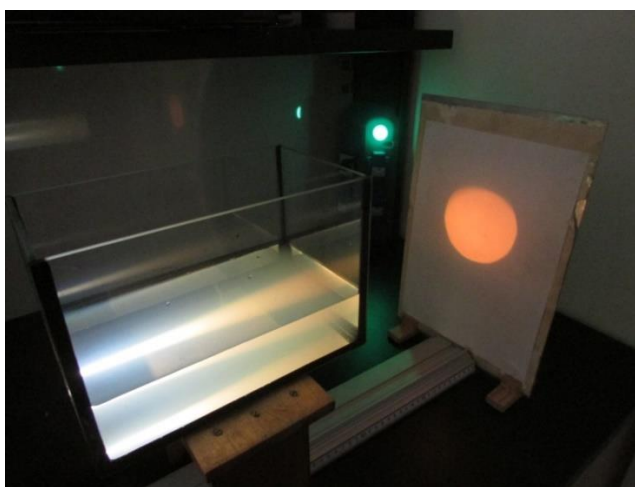


Рис.11. Прохождение света в мутной среде

Опыт №2. Наблюдение поляризации рассеянного света.

Для того чтобы показать, что рассеянный свет является поляризованным сделаем следующую демонстрацию.

Схема (рис. 12):

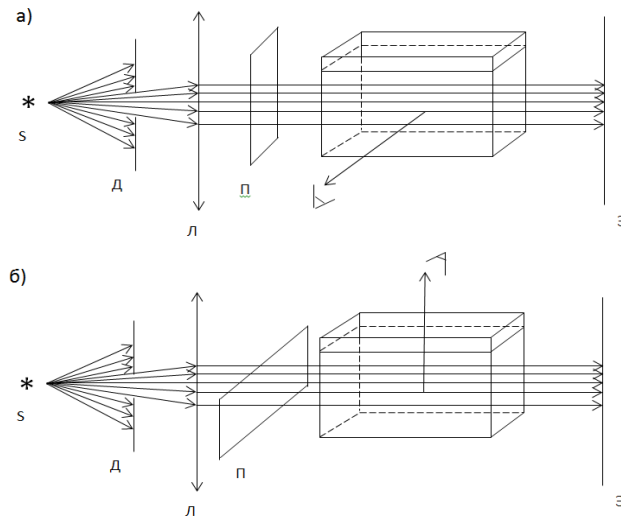


Рис. 12. Схема

Источник света испускает естественный свет. Перед кюветой с мутной средой поставим поляризатор, это означает, что на соответствующий объём, заполненный водой, падает линейно-поляризованный свет. При одном положении поляризатора, т.е. в случае вертикальной поляризации (рис. 12 а) мы видим рассеянный свет в боковых направлениях (рис. 13).

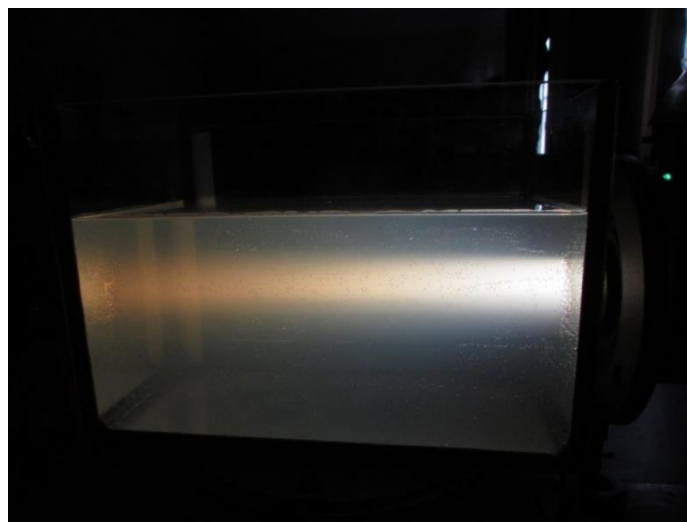


Рис. 13. Рассеянный свет в случае вертикальной поляризации

В случае горизонтальной поляризации (рис. 12 б), рассеянный свет наблюдается в верхнем и нижнем направлениях, а в боковом направлении не наблюдается (рис. 14).

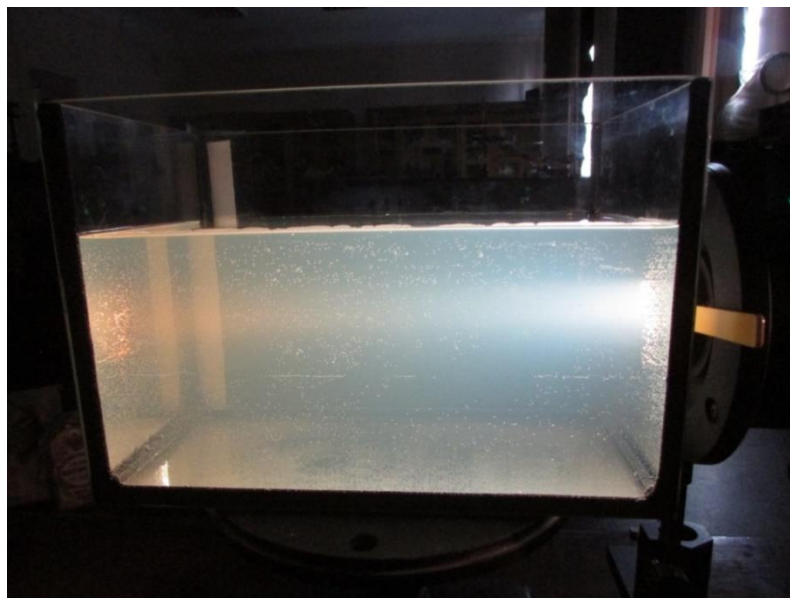


Рис. 14. Рассеянный свет в случае горизонтальной поляризации

Опыт №3. Зависимость интенсивности рассеянного света от длины волны.

Как было сказано ранее, интенсивность рассеяния зависит от длины волны падающего света. Чем меньше длина волны, тем сильнее происходит рассеяние света и, наоборот, чем больше длина волны, тем рассеяние слабее. Чтобы убедиться в этом рассмотрим следующую демонстрацию.

Схема эксперимента (рис. 15):

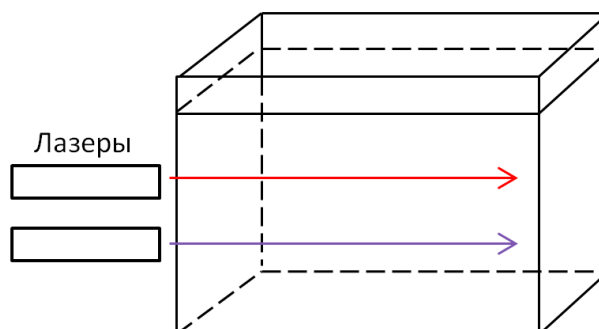


Рис. 15. Схема

Есть 2 лазерных пучка нижний – фиолетовый (λ : 440-380нм), верхний - красный (λ : 740-625 нм).

Кювета заполнена водой, здесь уже есть незначительное рассеяние, поэтому мы видим лучи от лазеров (рис. 16).

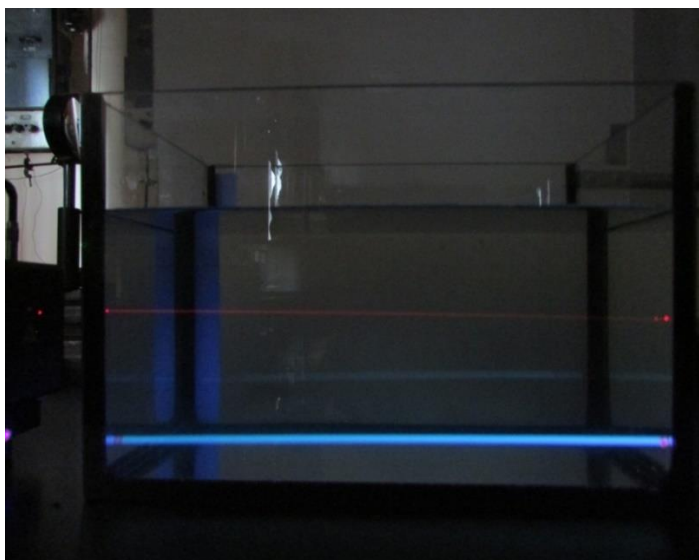


Рис. 16. Лучи лазеров в воде

Усилим оптическую неоднородность, добавив в воду рассеивающие центры. Видно, что фиолетовый луч начинает рассеиваться первым, так как он имеет меньшую длину волны, и этот луч уже не доходит до конца кюветы (рис. 17), т.е. коэффициент рассеяния для этой длины волны стал большой.

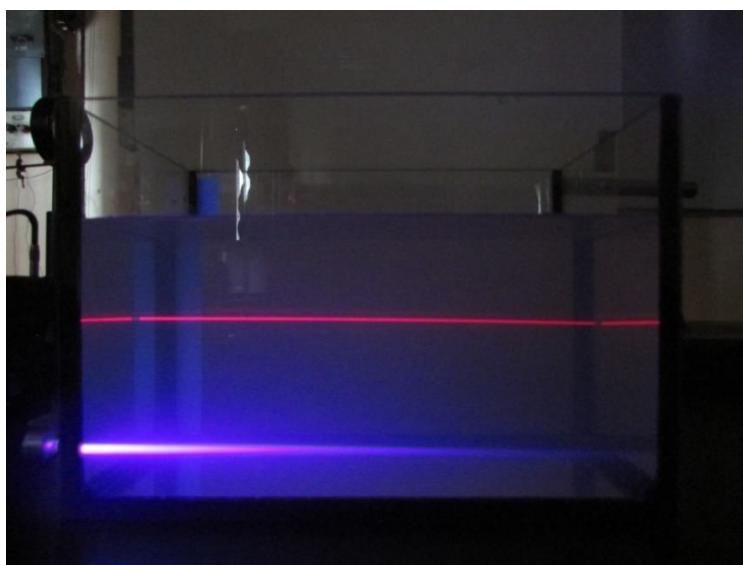


Рис. 17. Лучи лазеров в мутной среде

Добавим ещё рассеивающих центров, видно, что фиолетового луча почти нет, интенсивность красного луча в конце кюветы стала меньше, чем в начале, но красный луч по-прежнему, является менее рассеянным (рис. 18), поскольку имеет большую длину волны.

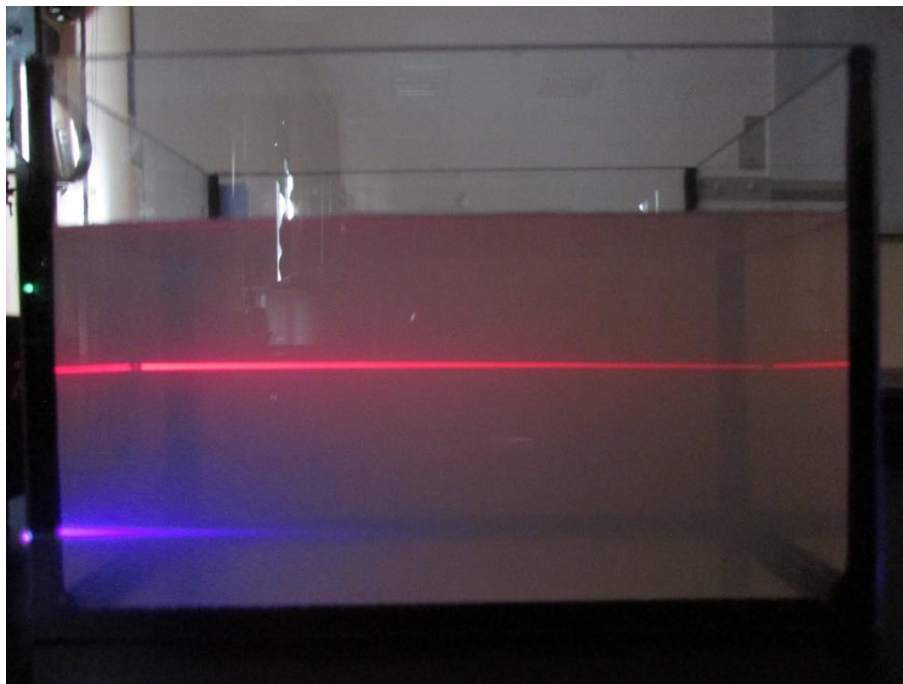


Рис. 18. Лучи лазеров в мутной среде с большей концентрацией рассеивающих центров

Приложение 2. Описание лабораторной работы

Распространение света в мутной среде

Цель работы: наблюдение поглощения и рассеяния света в мутной среде, определение величины ослабления света, прошедшего через мутную среду.

Приборы и принадлежности: лазер, фотоэлемент, зеркало, мультиметр, сосуд с мутной средой, колба.

Теоретическая часть

Свет, проходя через среду, может рассеиваться, т.е. энергия света перераспределяется по направлениям. Исходя из классических представлений о физике, свет, распространяясь в веществе, вызывает колебания электронов в атомах. Эти электроны, в свою очередь, являются источниками вторичных волн, которые распространяются по всем направлениям. Вторичные волны будут когерентны, поэтому необходимо помнить об их интерференции. При условии, что показатель преломления среды остаётся постоянным в разных её точках, т.е. среда является оптически однородной, вторичные волны будут гасить друг друга по всем направлениям, кроме того направления, в котором распространялась первичная волна, тогда явления рассеяния света не наблюдаются.

В зависимости от соотношения между длиной волны (частотой) и размером неоднородностей различают несколько видов светорассеяния. Пусть λ_n – длина волны падающего света, λ_p – длина волны рассеянного света, тогда:

- 5) если $\lambda_n = \lambda_p$, то такое рассеяние называют упругим. К упругому рассеянию относят: рэлеевское рассеяние и рассеяние Ми.

б) если $\lambda_n \neq \lambda_p$, то такое рассеяние называют неупругим. К нему относят: рассеяние Мандельштама – Бриллюэна и комбинационное рассеяние.

Рэлеевское рассеяние – это вид рассеяния на неоднородностях среды, при котором длина волны остаётся постоянной. Такое рассеяние можно наблюдать, когда размеры оптических неоднородностей d много меньше длины волны: $d \ll \lambda$.

Рассеяние Ми – упругое рассеяние на неоднородностях среды, размеры которых больше длины волны или равны ей: $d \geq \lambda$.

Рассеяние Мандельштама – Бриллюэна – рассеяние на упругих волнах. При таком рассеянии происходит изменение длины волны, т.е. оно является неупругим.

Комбинационное рассеяние – рассеяние на молекулах и атомах, сопровождающееся изменением длины волны рассеянного света.

Известно, что свет, проходя через вещество, теряет часть своей энергии, т.е. эта энергия поглощается веществом. В результате интенсивность света, при прохождении им вещества, становится меньше. Пусть свет проходит сквозь прозрачный слой толщиной d (рис. 1):

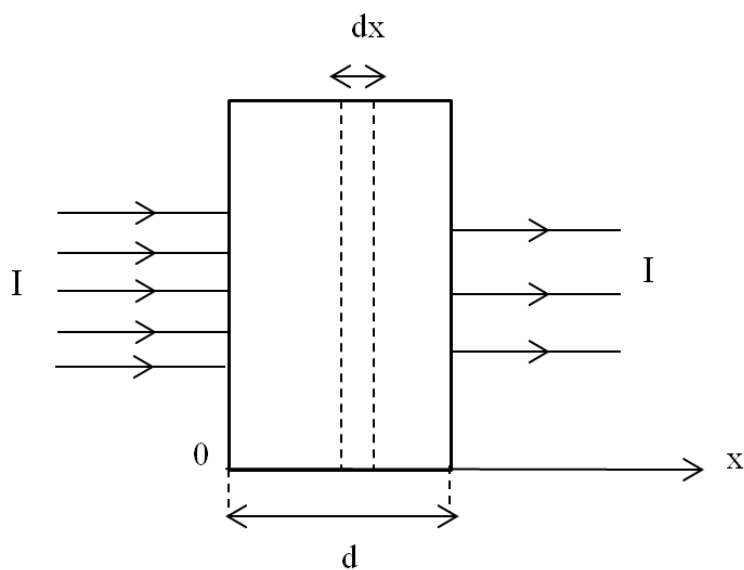


Рис. 1. Прохождение светом прозрачного слоя толщиной d

Пусть I_0 – интенсивность, которую имеет падающий свет, I – интенсивность света, прошедшего через слой. Т.к. слой поглотил часть света, то $I < I_0$. Из этого слоя выберем бесконечно тонкий слой толщиной dx . Изменение интенсивности будет прямо пропорционально толщине слоя и интенсивности падающего света.

$$dI = -\chi I_0 dx, \quad (1)$$

где χ – коэффициент пропорциональности, независящий от интенсивности света. Знак « $-$ » в выражении показывает, что при увеличении толщины слоя интенсивность света становится меньше.

Преобразуем данное выражение, разделив правую и левую части на I_0 , получим:

$$\frac{dI}{I_0} = -\chi dx. \quad (2)$$

Проинтегрировав формулу (2), получим:

$$I = I_0 e^{-\chi d}. \quad (3)$$

Выражение (3) носит название закона Бугера. Из закона видно, что, проходя через вещество, интенсивность света убывает по экспоненциальному закону. Коэффициент χ называется коэффициентом поглощения, он зависит от свойств вещества.

Проходя через оптически неоднородную среду, свет не только поглощается веществом, но и рассеивается. Вследствие светорассеяния интенсивность света в направлении распространения будет убывать быстрее, чем только при одном поглощении. Поэтому в законе Бугера появится ещё один коэффициент – χ' – коэффициент экстинкции, а сам закон примет вид:

$$I = I_0 e^{-(\chi + \chi')d}. \quad (4)$$

В данной работе необходимо определить величину ослабления света, прошедшего через мутную среду, поэтому в качестве такой величины будем понимать сумму коэффициента поглощения и коэффициента экстинкции:

$$k = \chi + \chi'. \quad (5)$$

Тогда формула (4) примет вид:

$$I = I_0 e^{-kd}. \quad (6)$$

Методика проведения эксперимента

Общий вид установки представлен на рис. 2. Пучок света, распространяющийся от лазера, попадает на зеркало, отражается от него и падает в кювету с неоднородной средой. В качестве такой среды используется смесь воды с одеколоном. Пройдя кювету с мутной средой, свет попадает на фотоэлемент, который подключен к мультиметру.

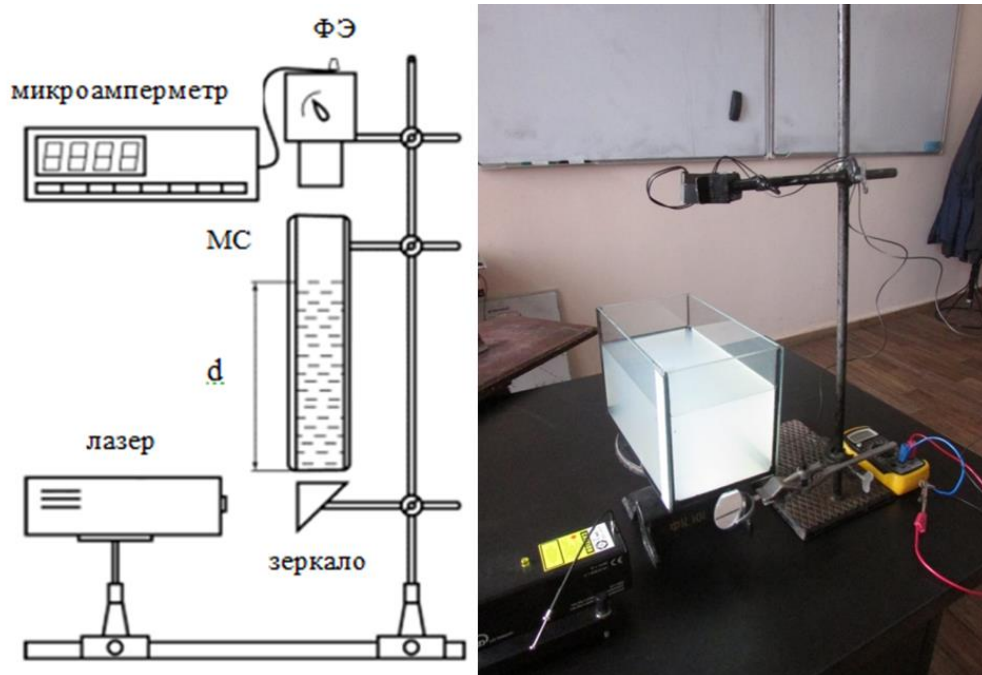


Рис. 2. Экспериментальная установка

В данном опыте определяют, как зависит значение фототока i от высоты столба жидкости d в сосуде. Известно, что величина фототока i и интенсивность света I , прошедшего через вещество, являются пропорциональными, тогда формула (6) примет вид:

$$i = i_0 e^{-kd}, \quad (7)$$

здесь i_0 – значение фототока, которое фиксирует мультиметр, когда свет проходит через пустой сосуд ($d = 0$).

Для доказательства того, что с ростом столба жидкости d величина фототока i будет уменьшаться по экспоненциальному закону, необходимо построить график, отражающий зависимость $\ln(i/i_0)$ от d . Преобразовав и прологарифмировав выражение (7), получим:

$$\ln(i/i_0) = -kd. \quad (8)$$

Тогда, если по экспериментальному графику между $\ln(i/i_0)$ и d наблюдается линейная зависимость (рис. 3), то формула (7) является справедливой, и закон Бугера (3) выполняется.

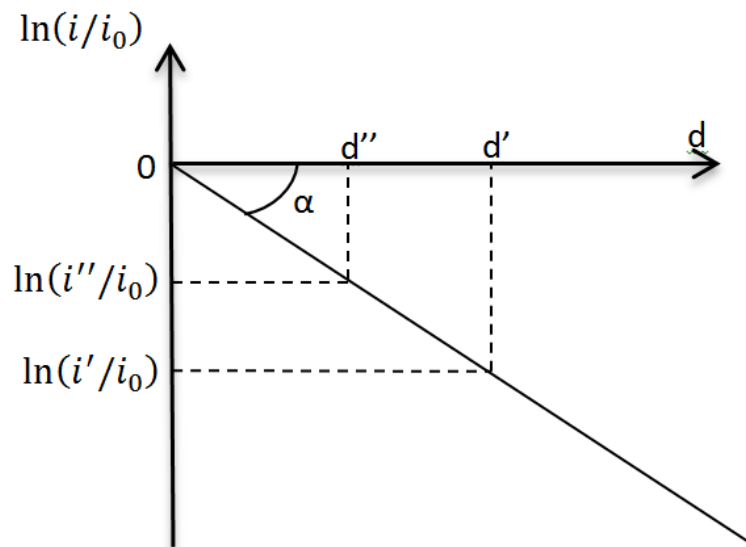


Рис. 3. График зависимости $\ln(i/i_0)$ от d

Преобразуя формулу (8), получим:

$$k = \frac{|\Delta \ln(i/i_0)|}{\Delta d} = \frac{|\ln(i'/i_0) - \ln(i''/i_0)|}{d' - d''}. \quad (9)$$

Таким образом, k можно определить по графику, как тангенс угла α (см. рис 3).

Порядок выполнения работы

1. Подготовьте мутную среду. Для этого в ёмкость налейте 3 л воды и добавьте 16 мл одеколона.
2. Соберите установку, как показано на рис. 2.
3. Включите лазер в сеть 220 В и проведите юстировку, так, чтобы свет от лазера, пройдя сосуд, падал на фотоэлемент.
4. Измерьте значение фототока i_0 при прохождении света через пустой сосуд ($d = 0$). Результат занесите в таблицу 1.
5. Встряхните ёмкость с мутной средой. Доливая по 1 см жидкости из ёмкости в сосуд, замечают показания мультиметра и записывают в таблицу 1.

Таблица 1.

d, см	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
i , мкА											
(i/i_0)	1										
$\ln(i/i_0)$	0										

Обработка результатов измерений

1. Для каждого значения d вычислите (i/i_0) и $\ln(i/i_0)$.
2. Постройте графики зависимости i и $\ln(i/i_0)$ от высоты столба мутной среды в сосуде. График зависимости $\ln(i/i_0)$ (d) строят по экспериментальным точкам не «на глаз», а используя метод наименьших квадратов (см. приложение 1).
3. Сравните построенный график зависимости $\ln(i/i_0)$ (d) с графиком, изображённым на рис.3. Подтверждается ли закон Бугера?
4. Используя полученный график, определите величину ослабления света k .
5. Рассчитайте погрешность определения величины ослабления света и запишите результат измерений.

Контрольные вопросы

1. Какими оптическими явлениями сопровождается прохождение света через вещество?
2. В чём заключается явление рассеяния света. Что является обязательным условием для возникновения светорассеяния?
3. Перечислите виды рассеяния света и их особенности.
4. Почему белый свет при прохождении через сосуд с неоднородной средой на начальном этапе кажется голубоватым, а чем дальше проходит, тем более желтоватый оттенок он приобретает?
5. Из формулы (2) получить формулу (3).

Приложение 1.

Метод наименьших квадратов (МНК)

Для того, чтобы построить график как можно ближе к точкам, полученным в ходе эксперимента, его нужно проводить не «на глаз». Для этого часто используют метод наименьших квадратов.

В том случае, когда мы заранее знаем вид функции $y = f(x)$, берутся такие значения кривой, чтобы сумма квадратов отклонений от неё всех экспериментальных точек $S = \sum_{j=1}^n (y_j - f(x_j))^2$ была наименьшей.

В нашей работе переменные $x = d$ и $y = \ln(i/i_0)$ имеют прямо пропорциональную зависимость $y = rx$. Нужно определить r для наилучшей прямой, проведённой по точкам, полученным в ходе эксперимента, (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , $\dots (x_j, y_j)$, $\dots, (x_n, y_n)$ (рис. 4). Чтобы определить минимальное значение суммы квадратов отклонений $S = \sum_{j=1}^n (y_j - rx_j)^2$ нужно приравнять нулю частную производную этой суммы по r :

$$\frac{\partial S}{\partial r} = \sum_{j=1}^n 2(y_j - rx_j)(-x_j) = 0,$$

$$-2 \left(\sum_{j=1}^n x_j y_j - r \sum_{j=1}^n x_j^2 \right) = 0,$$

$$r = \frac{\sum_{j=1}^n x_j y_j}{\sum_{j=1}^n x_j^2} \quad (10)$$

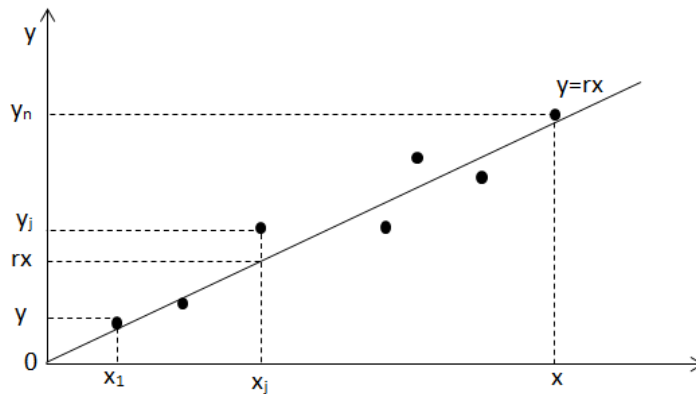


Рис.4.

Литература

1. Ландсберг Г. С. Оптика : Учебное пособие для вузов / Г. С. Ландсберг. – издание пятое. – Москва : Физматлит, 2006. – 848 с.
2. Савельев И. В. Курс общей физики : Учебное пособие. В 3-х тт. Т.2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – 3-е изд., испр. – Москва: Наука. Гл. ред. физ-мат лит., 1988. – 496 с.

Приложение 3. Примерный отчёт по лабораторной работе

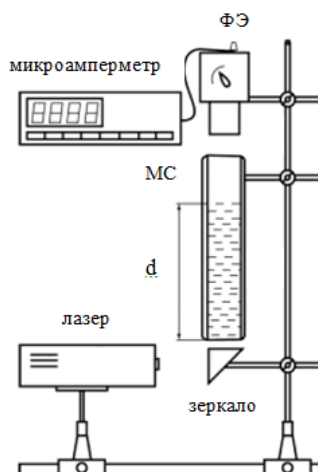
Лабораторная работа Распространение света в мутной среде

Цель работы: наблюдение поглощения и рассеяния света в мутной среде, определение величины ослабления света, прошедшего через мутную среду.

Приборы и принадлежности: лазер, фотоэлемент, зеркало, микрометр, сосуд с мутной средой, колба.

Расчётная формула: $k = \frac{\ln(i/i_0)}{d}$

Схема экспериментальной установки:



Экспериментальные данные:

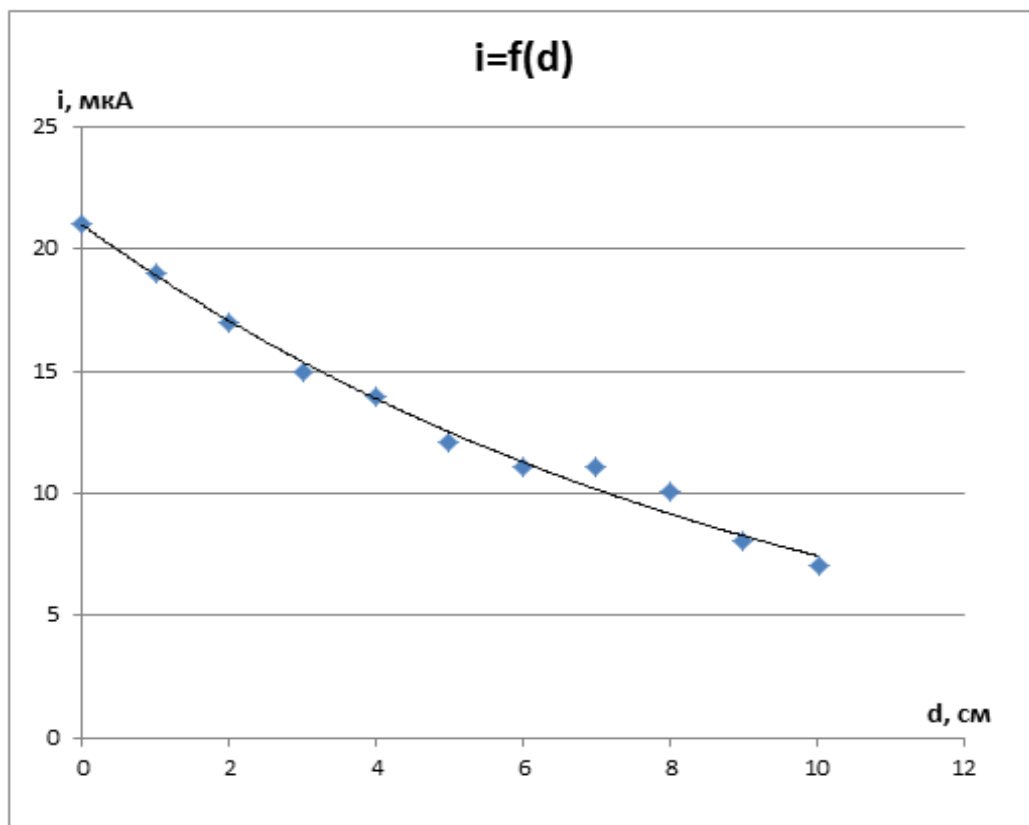
d, см	i, мА
0	0,021
1	0,019
2	0,017
3	0,015
4	0,014
5	0,012
6	0,011
7	0,011
8	0,01
9	0,008
10	0,007
$\Delta d = 0,1\text{см}$	$\Delta i = 1\text{мкА}$

Обработка результатов эксперимента:

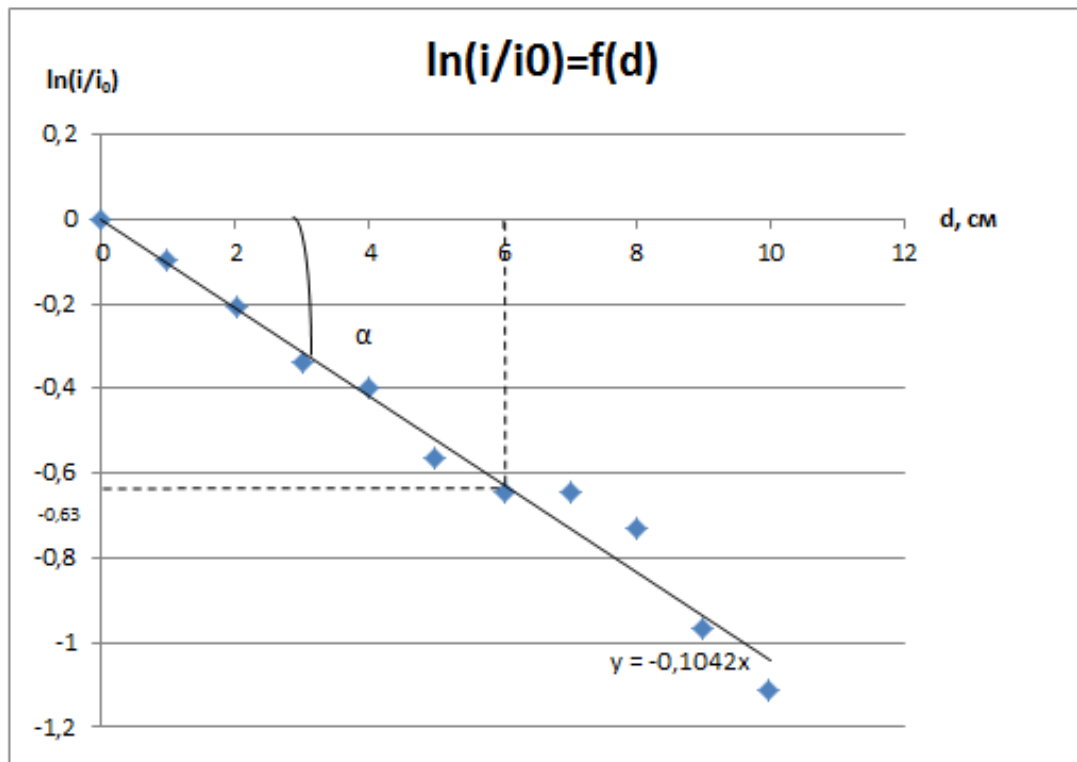
1)

$d, \text{ см}$	$i, \text{ мкА}$	i/i_0	$\ln(i/i_0)$
0	21	1	0
1	19	0,9	-0,1
2	17	0,81	-0,21
3	15	0,71	-0,34
4	14	0,67	-0,4
5	12	0,57	-0,56
6	11	0,52	-0,65
7	11	0,52	-0,65
8	10	0,48	-0,73
9	8	0,38	-0,97
10	7	0,33	-1,11

2) График зависимости фототока i от высоты столба жидкости d :



3) График зависимости $\ln(i/i_0)$ от высоты столба жидкости d :



4) Из графика видно, что закон Бугера подтверждается.

Определение углового коэффициента r по МНК:

$$r = \frac{\sum_{j=1}^n d_j \ln(i/i_0)_j}{\sum_{j=1}^n d_j^2}$$

$$r = \frac{-40,06 \text{ см}}{385 \text{ см}^2} = -0,1042 \text{ см}^{-1}$$

5) Расчёт коэффициента ослабления света k

$$d_6 = 6 \text{ см} \Rightarrow \ln(i/i_0)_6 = d_6 r = 6 \text{ см} \cdot (-0,1042 \text{ см}^{-1}) \approx -0,63$$

$$k = \operatorname{tg} \alpha = \frac{|\ln(i/i_0)|}{d} = \frac{|-0,63|}{6 \text{ см}} = 0,105 \text{ см}^{-1} \approx 0,11 \text{ см}^{-1}$$

6) Определение погрешности:

$$\Delta k = \Delta \operatorname{tg} \alpha = \Delta \left(\frac{\ln(i/i_0)}{d} \right) = \frac{(\Delta \ln(i/i_0))d + \Delta d (\ln(i/i_0))}{d^2}$$

i , мкА	i/i_0	Δi , мкА	$\Delta(i/i_0)=(\Delta i(i_0+i))/(i_0)^2$	$\Delta(\ln(i/i_0))=(\Delta(i/i_0))/(i/i_0)$	Δd , см
21	1				
19	0,9		0,090702948	0,100781053	0,1
17	0,81		0,0861678	0,106380001	
15	0,71		0,081632653	0,114975568	
14	0,67		0,079365079	0,118455342	
12	0,57	1	0,074829932	0,131280582	
11	0,52		0,072562358	0,139542997	
11	0,52		0,072562358	0,139542997	
10	0,48		0,070294785	0,146447468	
8	0,38		0,065759637	0,173051677	
7	0,33		0,063492063	0,192400192	

Значения d и $\ln(i/i_0)$ определяют по графику.

Пусть $d = 6\text{см}$, тогда $\ln(i/i_0) = -0,63$

Мах $\Delta \ln(i/i_0) \approx 0,19$

$$\Delta k = \frac{(0,19 \cdot 6\text{см}) + (0,1\text{см} \cdot 0,63)}{(6\text{см})^2} \approx 0,03\text{см}^{-1}$$

Ответ: $k = (0,11 \pm 0,03) \text{см}^{-1}$ при $\varepsilon = 27\%$

Приложение 4. Описание домашнего эксперимента

Домашний компьютерный эксперимент «Рассеяние света в мутных средах»

Цель работы: познакомиться с явлением рассеяния света в мутных средах, с помощью компьютерного моделирования изучить его характеристики.

Теоретическая часть

Свет, проходя через среду, может рассеиваться, т.е. энергия света перераспределяется по направлениям. Исходя из классических представлений о физике, свет, распространяясь в веществе, вызывает колебания электронов в атомах. Эти электроны, в свою очередь, являются источниками вторичных волн, которые распространяются по всем направлениям. Вторичные волны будут когерентны, поэтому необходимо помнить об их интерференции. При условии, что показатель преломления среды остаётся постоянным в разных её точках, т.е. среда является оптически однородной, вторичные волны будут гасить друг друга по всем направлениям, кроме того направления, в котором распространялась первичная волна, тогда явления рассеяния света не наблюдается.

В случае, когда среда неоднородна, вторичные волны не будут гасить друг друга по разным направлениям, они дифрагируют на неоднородностях среды и получаемая дифракционная картина характеризуется равномерным распространением интенсивности по разным направлениям. Эта дифракция на мелких неоднородностях среды получила название рассеяния света.

В реальности оптически однородных сред не бывает, всегда присутствуют неоднородности разного происхождения, поэтому рассеяний свет всегда существует, но имеет разную интенсивность.

Если оптические неоднородности среды носят явный характер, такие среды называют мутными. Мутными средами являются: дым – взвесь мельчайших твердых частиц в газе; туман – взвесь в газах капель жидкости; сус-

пензии – твёрдые частички в жидкости; эмульсии – капельки одной жидкости в другой. К мутным средам относятся и некоторые твёрдые тела, такие, как: опалы, перламутр, молочное стекло и другие. Рассеяние в мутных средах называют явлением Тиндаля.

Предположения, на которых основана физическая модель, описывающая явление рассеяния света, состоят в следующем: форма рассеивающих частиц является сферической с радиусом r , оптические свойства частицы характеризуются показателем преломления n , у частиц отсутствуют электропроводящие свойства. Когда свет проходит через среду с такими частицами, то под действием переменного электрического поля у частиц появляются дипольные моменты, при этом сама частица начинает излучать вторичные электромагнитные волны. Определив суммарную интенсивность вторичных колебаний, можно описать параметры рассеянного света в любой точке данного объёма.

Неравенство (1) позволяет определить характеристики рассеянного света

$$\frac{2\pi nr}{\lambda} \ll 1, \quad (1)$$

где λ - это длина волны света.

Рассмотрим опыт Тиндаля, схема которого приведена на рисунке 1.

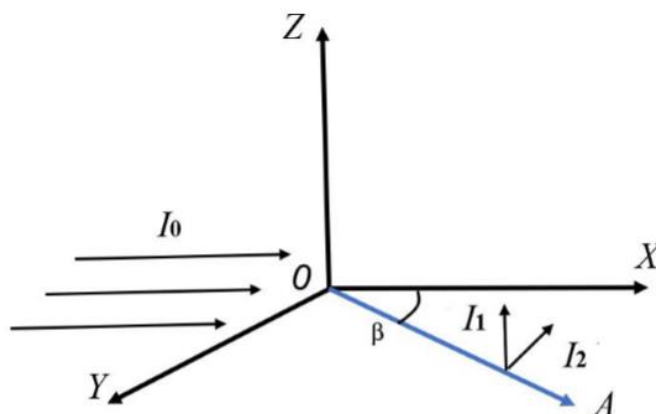


Рис. 1. Схема опыта Тиндаля

Естественный свет, интенсивность которого равна I_0 , проходит через мутную среду, при этом его направление совпадает с направлением оси X . Линия OA задаёт направление, вдоль которого распространяется рассеянный свет, и составляет с осью X угол θ . Тогда рассеянный свет можно выразить через две составляющие I_1 и I_2 , где I_1 – составляющая, для которой вектор напряженности электрического поля рассеянного света лежит в плоскости перпендикулярной плоскости XOY , а I_2 – составляющая, для которой вектор напряженности электрического поля лежит в плоскости параллельной плоскости XOY . Данные интенсивности можно выразить следующим образом:

$$I_1 = I_0 \frac{9\pi^2 V^2}{\lambda^4 R^2} N \left(\frac{n^2 - k^2}{n^2 + 2k^2} \right) k^4 \frac{1}{2}, \quad (2)$$

$$I_2 = I_0 \frac{9\pi^2 V^2}{\lambda^4 R^2} N \left(\frac{n^2 - k^2}{n^2 + 2k^2} \right) k^4 \frac{\cos^2(\theta)}{2}, \quad (3)$$

где угол θ – угол рассеяния, изменяющийся в пределах от 0° до 360° , n – показатель преломления частицы, k – показатель преломления среды, N – концентрация частиц, V – объём частицы (для сферической частицы $V = \frac{4}{3}\pi r^3$, где r – радиус), R – расстояние от рассеивателя до точки наблюдения.

Суммарная интенсивность рассеянного света будет иметь вид:

$$I = I_1 + I_2 = I_0 \frac{9\pi^2 V^2}{\lambda^4 R^2} N \left(\frac{n^2 - k^2}{n^2 + 2k^2} \right) \frac{k^4}{2} (1 + \cos^2(\theta)). \quad (4)$$

Из формулы (4) можно сделать следующие выводы:

- 1) $I \sim \frac{1}{\lambda^4}$;
- 2) Если начало отсчёта полярной системы координат совместить с частицей и отложить по направлению угла рассеяния θ отрезок, рав-

ный интенсивности рассеянного излучения $I(\theta)$, то изменяя угол можно построить индикатрису рассеяния.

При углах рассеяния $\theta = \frac{\pi}{2}$, $\theta = \frac{3\pi}{2}$ интенсивность света $I_2 = 0 \Rightarrow$

рассеянный свет становится линейно-поляризованным;

- 3) В случае равенства показателей преломления среды и рассеивающих частиц, т.е. $n = k$, рассеяние света не происходит.

Экспериментальная часть

В данной работе эксперимент выполняется методом компьютерного моделирования в математическом пакете программ Maple 12, который необходимо установить на свой компьютер. Все полученные результаты должны быть представлены в отчёте. Варианты работы, и данные для эксперимента указаны в таблице 1. Перед началом работы необходимо уточнить у преподавателя номер своего варианта.

Таблица 1

№ Варианта	Природа частицы и среды	Интенсивность исходного пучка W_0	Размер частицы r , мкм	Показатель преломления частицы n	Показатель преломления среды k	Расстояние до точки наблюдения R , мкм	Концентрация N
1	вода в воздухе	1	0,025	1,33	1	10^5	10^5
2	уголь в воздухе	1	0,02	1,78	1	20^5	10^5
3	нефть в воде	1	0,025	1,5	1,33	35^5	10^5
4	уголь в воде	1	0,02	1,78	1,33	20^5	10^5
5	песок в воздухе	1	0,025	1,46	1	40^5	10^5

Знакомство с Maple 12

Maple – математический программный пакет, который был разработан компанией Waterloo Maple Inc. Данный пакет программ позволяет производить как простые, так и сложные математические вычисления, служит для визуализации данных и моделирования.

Интерфейс программы Maple 12 представлен на рис. 2.

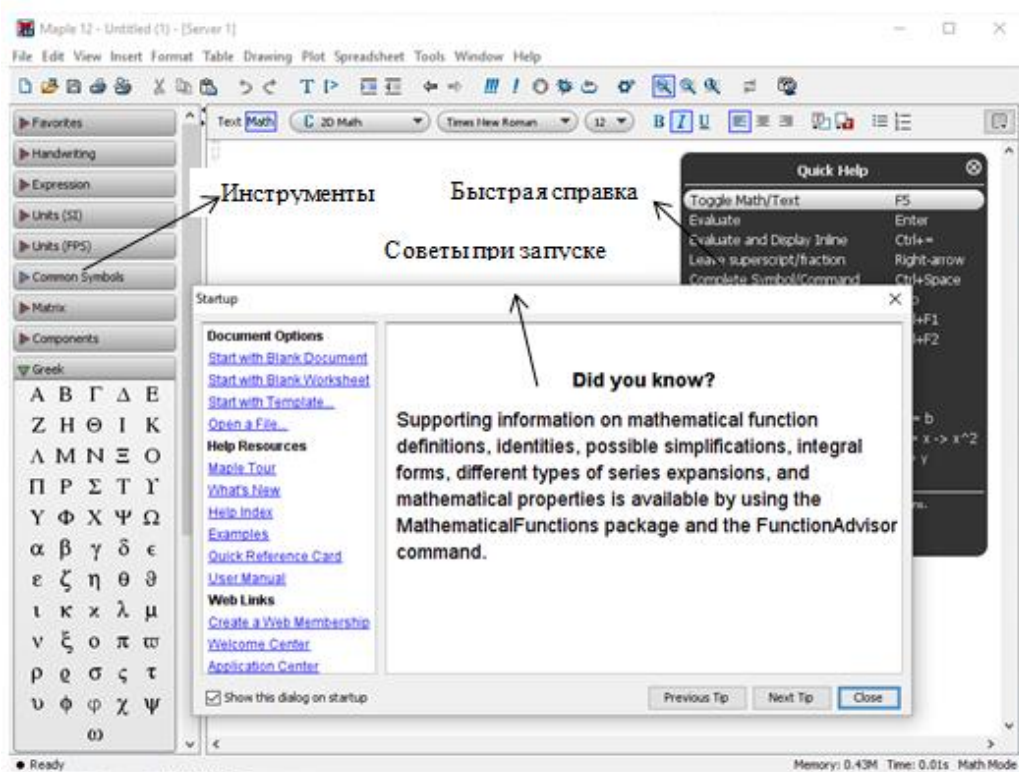


Рис. 2. Интерфейс программы Maple 12

Для того чтобы в рабочее поле можно было записать какую-либо команду (например, математическое выражение), на панели управления нужно выбрать «Math», для ввода текста используется «Text» (рис. 3).

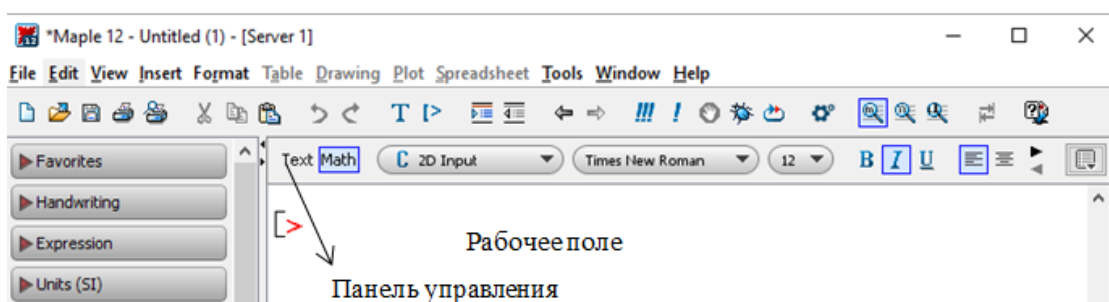


Рис. 3. Панель управления и рабочее поле

Любая команда должна заканчиваться точкой с запятой (;) или двоеточием (:), при этом, в первом случае обработанная команда выводится на экран, а во втором – нет. Команды выполняются после нажатия клавиши «Enter». Каждая командная строка - "живая", т.е. её можно скорректировать в любой момент.

В Maple величина I - мнимая единица, встроенная константа, которую нельзя переназначить, поэтому привычное обозначение для интенсивности света нужно заменить на другую букву.

Тогда перепишем формулы 2, 3 и 4, учитывая этот факт:

$$W_1 = W_0 \frac{9\pi^2 V^2}{\lambda^4 R^2} N \left(\frac{n^2 - k^2}{n^2 + 2k^2} \right) k^4 \frac{1}{2}, \quad (5)$$

$$W_2 = W_0 \frac{9\pi^2 V^2}{\lambda^4 R^2} N \left(\frac{n^2 - k^2}{n^2 + 2k^2} \right) k^4 \frac{\cos^2(\theta)}{2}, \quad (6)$$

$$W = W_1 + W_2 = W_0 \frac{9\pi^2 V^2}{\lambda^4 R^2} N \left(\frac{n^2 - k^2}{n^2 + 2k^2} \right) \frac{k^4}{2} (1 + \cos^2(\theta)). \quad (7)$$

Описание работы с командами в Maple 12

1) Запись формулы.

Символы, входящие в формулу набирают с клавиатуры, а так же, при необходимости, используют из панели инструментов (например, символ θ). Для возведения числа в степень используют символ (^). В формуле используется знак присваивания (:=).

Пример: $y := x^4 + \sin^2(\theta)$;

2) Подстановка численных значений в формулу.

Для подстановки численных значений в формулу, используют команду **subs** (substitute – «подстановка»). После ввода какой-либо команды открывают круглые скобки, так после команды **subs** открывают скобки,

в которых, через запятую вводят численные значения величин, входящих в формулу, а в конце указывают искомую величину.

Пример: `subs(x=2, sin(theta) = sin(pi/3), y);`

3) Построение графика функции в полярных координатах.

При первом переходе к полярной системе координат обязательно обращение **with(plots)**, для того, чтобы все опции не выводились на экран, в конце команды поставим двоеточие. Для того, чтобы перейти в полярную систему координат используют команду **polartplot**. В круглых скобках записывают функцию, пределы изменения переменной (для этого ставят две последовательные точки), можно указать толщину линии графика (для этого используют опцию **thickness**) и цвет (**color**).

Пример: `with(plots):`

`polartplot(sin^2(theta), theta = -pi...pi, thickness=2, color=red);`

Чтобы построить несколько кривых на одном графике необходимо задать список, т.е. функции вводят в квадратных скобках. Цвета для каждой зависимости так же можно задать в виде списка.

Пример: `polartplot([sin^2(theta), cos^2(theta)], theta = -pi...pi, thickness=2, color=[red, green]);`

4) Сброс назначений.

Для того чтобы отменить все сделанные назначения просто необходимо ввести и выполнить команду **restart**.

Порядок выполнения работы:

Задание №1.

а) В полярной системе координат построить индикатрису рассеяния для интенсивности света W_1 для углов, изменяющихся от 0° до 360° .

Длина волны $\lambda=0,36$ мкм. Остальные величины считать постоянными и взять их из таблицы 1, согласно номеру варианта.

Комментарии к заданию: В области ввода рабочего листа нужно записать выражение (5), убедившись первоначально, что включен режим ввода математических формул «Math». В конце выражения поставить символ ';' и нажать клавишу 'Enter', после чего Maple произведёт обработку и выведет выражение на экран. Далее в формулу необходимо подставить значения известных величин (значения величин берутся из таблицы 1, исходя из номера варианта). Затем постройте график полученного значения в полярной системе координат.

б) В полярной системе координат построить индикатрису рассеяния для интенсивности света W_2 для углов, изменяющихся от 0° до 360° . Длина волны $\lambda=0,36$ мкм. Остальные величины считать постоянными и взять их из таблицы 1, согласно номеру варианта.

Комментарии к заданию: Видно, что формулу (6) можно представить, как произведение формулы (5) и $\cos^2(\theta)$, для удобства так и сделаем. А далее постройте график, как в пункте (а), изменив цвет.

в) Построить индикатрисы рассеяния из пунктов а) и б) на одном графике в полярной системе координат.

Комментарии к заданию: Чтобы построить две индикатрисы рассеяния на одном графике функции задают в квадратных скобках, через запятую.

г) Добавить к последнему графику суммарную индикатрису рассеяния.

Комментарии к заданию: Добавьте к последнему графику суммарную индикатрису рассеяния. Выражение, для формулы (7) можно представить, как произведение формулы (5) и $(1 + \cos^2(\theta))$.

Задание №2.

В полярной системе координат на одном графике построить индикатрисы рассеяния для 3-х длин волн: 0.45, 0.53, 0.78 мкм, для уг-

лов, изменяющихся от 0° до 360° . Остальные величины считать постоянными и взять их из таблицы 1, согласно номеру варианта. Сделать вывод о зависимости индикатрисы рассеяния от длины волны.

Комментарии к заданию: Перед выполнением задания необходимо применить команду **restart**. Затем ввести формулу (7), подставить в формулу известные данные для разных длин волн. Получим три функции. Для построения графика в список лучше подставлять функции в более удобном виде (для этого вынесим общий член за скобку).

Задание №3.

Рассчитать суммарную интенсивность W для разных углов : 0° , 45° , 90° Расчёты выполнить для длины волны $\lambda=0,4$ мкм. Сделать вывод о зависимости интенсивности рассеянного света от угла.

Комментарии к заданию: Перед выполнением задания применить команду **restart**. Записать формулу для суммарной интенсивности и подставить известные данные.

Контрольные вопросы

1. Какой зависимостью связаны интенсивность рассеянного света с длиной волны падающего света, если размеры неоднородностей малы?
2. Как интенсивность рассеянного света зависит от радиуса рассеивателя?
3. В каком случае рассеяние света не происходит?

Литература

1. Ландсберг Г. С. Оптика : Учебное пособие для вузов / Г. С. Ландсберг. – издание пятое. – Москва : Физматлит, 2006. – 848 с.
2. Савельев И. В. Курс общей физики : Учебное пособие. В 3-х тт. Т.2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – 3-е изд., испр. – Москва: Наука. Гл. ред. физ-мат лит., 1988. – 496 с.

Приложение 5. Примерный отчёт по домашнему эксперименту

Домашний компьютерный эксперимент «Рассеяние света в мутных средах»

Цель работы: познакомиться с явлением рассеяния света в мутных средах, с помощью компьютерного моделирования изучить его характеристики.

Задание №1.

а)

The screenshot shows the Maple 12 interface with the following content:

```
> W1 := W0 * (4 * pi * r^3 / 3)^2 / (lambda^4 * R^2) * N * (n^2 - k^2) / (n^2 + 2 * k^2) * k^4;
```

$$W1 := \frac{8 W_0 \pi^4 r^6 N (n^2 - k^2) k^4}{\lambda^4 R^2 (n^2 + 2 k^2)} \quad (1)$$

```
> subs(r = 0.025, W0 = 1, lambda = 0.36, R = 100000, N = 100000, n = 1.33, k = 1, pi = 3.14, W1);
```

$$2.306183574 \cdot 10^{-11} \quad (2)$$

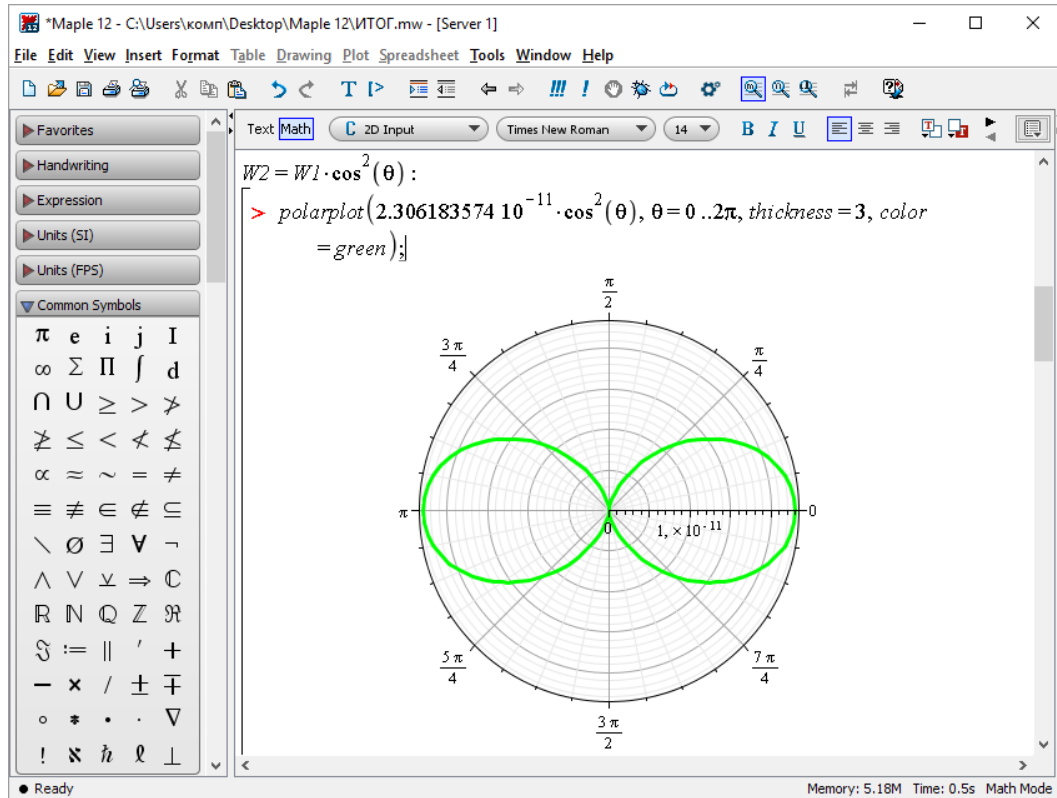
```
> with(plots):
```

```
> polarplot(2.306183574 * 10^-11, theta = 0 .. 2 * pi, thickness = 3, color = red, scaling = constrained);
```

The polar plot shows a single red circle centered at the origin of a polar coordinate system. The radial axis is labeled with 0 and $1, \times 10^{-11}$. The angular axis is labeled with $0, \frac{\pi}{4}, \frac{2\pi}{4}, \frac{3\pi}{4}, \pi, \frac{5\pi}{4}, \frac{6\pi}{4}, \frac{7\pi}{4},$ and 2π . The circle's radius is constant, indicating that the intensity of light is independent of the angle.

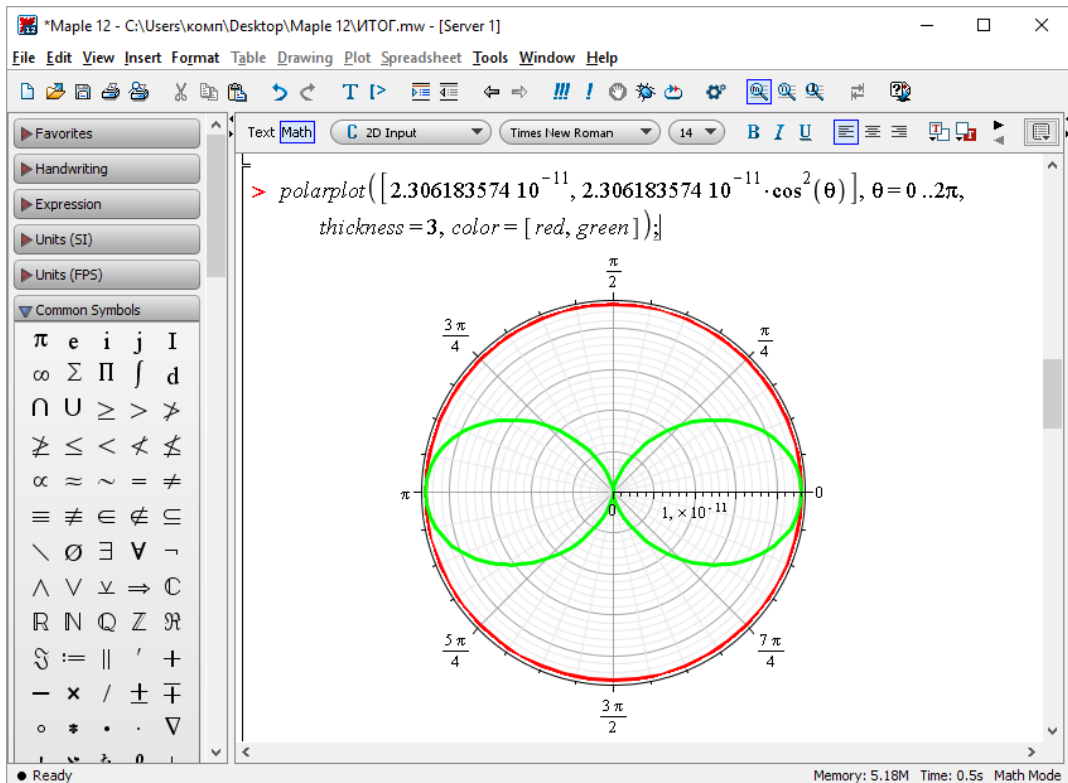
Видно, что для первой составляющей интенсивность света для разных углов остаётся постоянной величиной.

б)

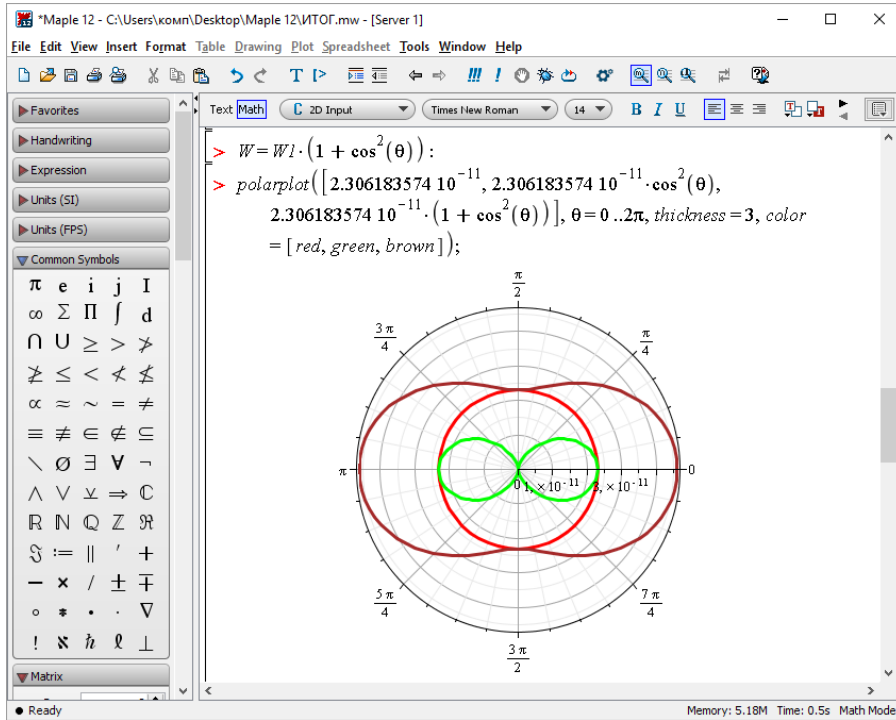


Интенсивность второй составляющей будет максимальна по направлению распространения первичного пучка света.

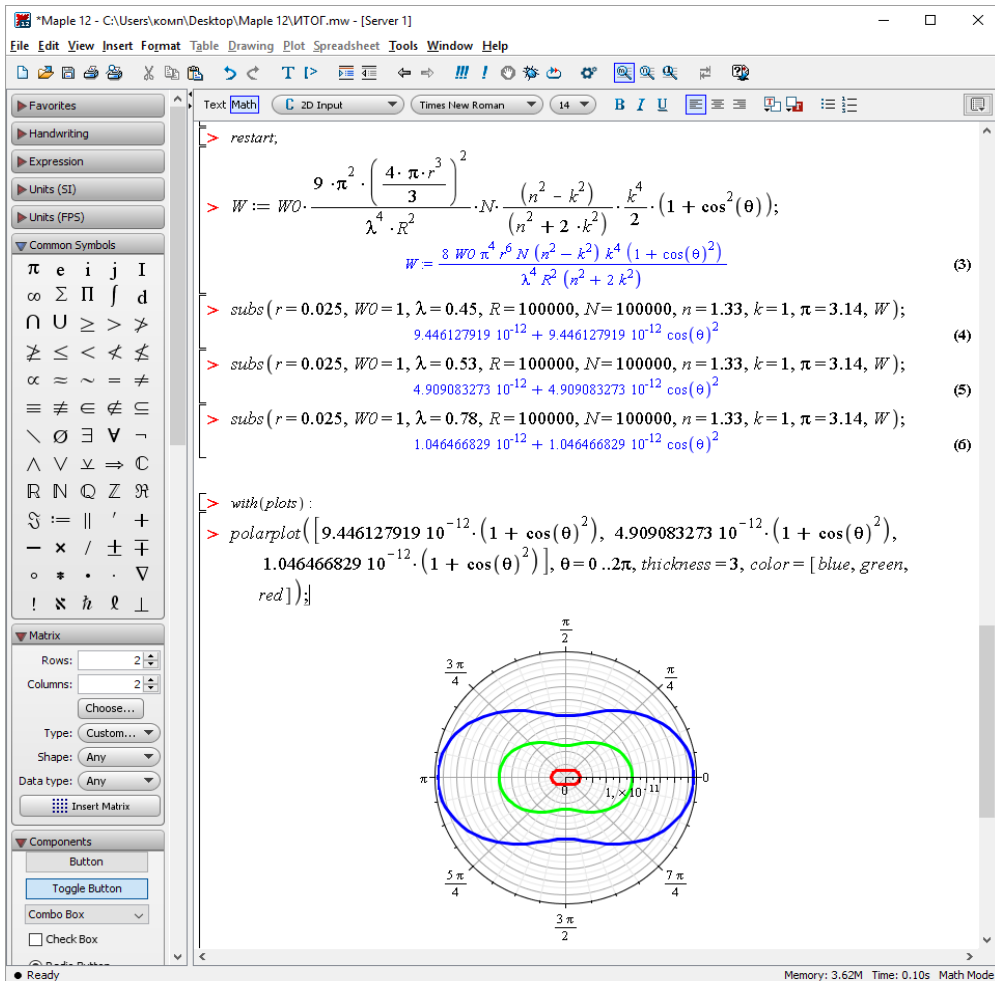
в)



Г)



Задание №2.



Вывод: При увеличении длины волны падающего света интенсивность рассеянного света становится меньше: $I \sim \frac{1}{\lambda^4}$.

Задание №3.

Maple 12 - C:\Users\комн\Desktop\Maple 12\ИТОГ.mw - [Server 1]

File Edit View Insert Format Table Drawing Plot Spreadsheet Tools Window Help

Text Math C 2D Input Times New Roman 12 B I U

> restart,
 >
$$W := WO \cdot \frac{9 \cdot \pi^2 \cdot \left(\frac{4 \cdot \pi \cdot r^3}{3}\right)^2}{\lambda^4 \cdot R^2} \cdot N \cdot \frac{(n^2 - k^2)}{(n^2 + 2 \cdot k^2)} \cdot \frac{k^4}{2} \cdot (1 + \cos^2(\theta)):$$

 > subs(r=0.025, WO=1, lambda=0.4, R=100000, N=100000, n=1.33, k=1, pi=3.14, cos(theta)=cos(0), W);

$$3.026174086 \cdot 10^{-11} \quad (7)$$

 > subs(r=0.025, WO=1, lambda=0.4, R=100000, N=100000, n=1.33, k=1, pi=3.14, cos(theta)=cos(pi/4), W);

$$2.269630564 \cdot 10^{-11} \quad (8)$$

 > subs(r=0.025, WO=1, lambda=0.4, R=100000, N=100000, n=1.33, k=1, pi=3.14, cos(theta)=cos(pi/2), W);

$$1.513087043 \cdot 10^{-11} \quad (9)$$

Ready Memory: 4.24M Time: 0.75s Math Mode

Вывод: Максимальная интенсивность будет наблюдаться в прямом направлении, т.е. когда $\theta = 0$, а минимальная – под углом $\theta = \frac{\pi}{2}$.