

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Ордена Трудового Красного Знамени  
Институт солнечно-земной физики  
Сибирского отделения Российской академии наук  
(ИСЗФ СО РАН)

XV НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ШКОЛЬНИКОВ  
«ЧЕЛОВЕК И КОСМОС»

**Эффект Тиндаля:  
от лабораторного эксперимента к дымовому извещателю**

Выполнил:  
Фёдоров Роман,  
ученик 8 класса  
МБОУ «Илькинская СОШ»  
Заиграевского района Республики Бурятия

Учитель физики:  
Абашеева Светлана Бато-Мунхоевна  
МБОУ «Илькинская СОШ»  
Заиграевского района Республики Бурятия  
+79246553145, [sabasheeva@yandex.ru](mailto:sabasheeva@yandex.ru)

Научный руководитель:  
Смотрова Екатерина Евгеньевна,  
магистрант 1 курса ИСЗФ СО РАН  
[katerina.smotrova@mail.iszf.irk.ru](mailto:katerina.smotrova@mail.iszf.irk.ru)  
<https://vk.com/katercatya>

## СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение.....	3
2. Теоретическая часть.....	5
3. Экспериментальная часть.....	8
4. Практическое применение эффекта Тиндаля.....	15
5. Заключение.....	19
6. Список литературы.....	20
7. Приложение.....	21

## ВВЕДЕНИЕ

Свет сопровождает человека на протяжении всей его жизни. Мы привыкли видеть солнечные лучи, пронизывающие утренний туман, замечаем, как луч фар становится ярко видимым в снегопад или дождь, наблюдаем голубизну неба и багровые закаты. Все эти явления объединяет один физический процесс — рассеяние света на микроскопических частицах, взвешенных в воздухе, воде или других средах. В 1869 году ирландский физик Джон Тиндаль впервые систематически описал это явление, которое впоследствии получило его имя. Эффект Тиндаля заключается в том, что при прохождении светового пучка через оптически неоднородную среду, содержащую взвешенные частицы размером от 0,1 до 10 микрон, свет рассеивается во все стороны, делая траекторию луча видимой для наблюдателя.

Актуальность данной работы обусловлена не только фундаментальным значением эффекта Тиндаля для понимания оптических явлений, но и его широким практическим применением в современной технике. Наиболее значимым примером является работа оптических дымовых извещателей — устройств, которые ежедневно спасают тысячи жизней, своевременно предупреждая о возникновении пожара.

Целью данной работы является экспериментальное исследование эффекта Тиндаля и выявление его роли в работе оптических дымовых извещателей.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Изучить теоретические основы эффекта Тиндаля, его физическую природу и математическое описание.
2. Разработать и реализовать серию наглядных экспериментов по наблюдению рассеяния света на взвешенных частицах молока и частицах дыма.
3. Исследовать зависимость интенсивности рассеяния от длины волны падающего света с использованием лазерных указок разного цвета (красного, зеленого, фиолетового).
4. Изучить влияние концентрации взвешенных частиц на характер рассеяния света.
5. Проанализировать устройство и принцип работы оптического дымового извещателя.
6. Установить связь между результатами лабораторных экспериментов и конструктивными особенностями реальных извещателей.

Объект исследования — явление рассеяния света в неоднородных средах — эффект Тиндаля.

Предмет исследования — закономерности рассеяния света в зависимости от длины волны излучения и концентрации рассеивающих частиц, а также их применение в технике.

Гипотеза исследования заключается в следующем: интенсивность рассеяния света на микроскопических частицах обратно пропорциональна четвертой степени длины волны

падающего излучения ( $I = \frac{1}{\lambda^4}$ ), что объясняет использование в оптических дымовых извещателях источников света с короткой длиной волны (синие или зеленые светодиоды).

Практическая значимость работы заключается в наглядной демонстрации того, как фундаментальные физические законы находят применение в устройствах, обеспечивающих безопасность человека. Результаты исследования могут быть использованы на уроках физики при изучении темы «Оптика» (раздел «Рассеяние света»), а также на занятиях по основам безопасности жизнедеятельности при рассмотрении принципов работы систем пожарной сигнализации.

## I. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### 1.1. История открытия эффекта Тиндаля.

Эффект Тиндаля — одно из удивительных оптических явлений, названное в честь ирландского физика Джона Тиндаля (1820–1893). В 1869 году Тиндаль, изучая прохождение света через различные среды, обратил внимание на то, что в чистых жидкостях и газах световой луч остается невидимым, но стоит появиться мельчайшим взвешенным частицам — пыли, дыму, каплям жидкости, — как луч становится ярко видимым. Ученый впервые систематически описал это явление и объяснил его природу, связав с рассеянием света на микроскопических частицах, которое впоследствии получило его имя.

### 1.2. Физическая сущность эффекта Тиндаля

Эффект Тиндаля — это явление рассеяния света при его прохождении через оптически неоднородную среду, содержащую взвешенные частицы, размер которых меньше длины волны света (или сопоставим с ней). Такие среды называются коллоидными системами или аэрозолями.

Механизм явления заключается в следующем: когда световая волна встречает на своем пути частицу, размеры которой сравнимы с длиной волны, частица начинает действовать как вторичный источник света. Под действием электромагнитного поля световой волны электроны в частице приходят в колебательное движение и сами начинают излучать электромагнитные волны во всех направлениях. Таким образом, частица переизлучает падающий на нее свет, и этот переизлученный (рассеянный) свет становится видимым наблюдателю сбоку.

Важно отметить, что эффект Тиндаля наблюдается только при определенных условиях:

- Размер частиц должен быть меньше длины волны света (или сопоставим с ней)
- Показатели преломления частицы и окружающей среды должны различаться
- Концентрация частиц должна быть достаточной для заметного рассеяния

### 1.3. Законы рассеяния света

Интенсивность рассеянного света описывается формулой Рэлея, выведенной британским физиком Джоном Уильямом Стреттом (лордом Рэлеем) в 1871 году. Для частиц, размер которых значительно меньше длины волны света (так называемое рэлеевское рассеяние), интенсивность рассеяния обратно пропорциональна четвертой степени длины волны  $I = \frac{1}{\lambda^4}$ .

Это означает, что свет с меньшей длиной волны рассеивается значительно сильнее.

Например, если сравнить красный свет ( $\lambda = 650$  нм) и фиолетовый ( $\lambda = 405$  нм):

$$I_{\text{красн}} / I_{\text{фиол}} = (650 / 405)^4 \approx (1,605)^4 \approx 6,6$$

Таким образом, фиолетовый свет рассеивается примерно в 6,6 раза сильнее красного. Это фундаментальное соотношение и будет проверено в нашей экспериментальной работе.

#### 1.4. Зависимость от угла рассеяния

Важной характеристикой эффекта Тиндаля является угловая зависимость рассеянного света.

- Максимальная интенсивность рассеяния наблюдается под углами  $0^\circ$  и  $180^\circ$  (вперед и назад)
- Минимальная интенсивность — под углом  $90^\circ$  (перпендикулярно падающему лучу)

Эта зависимость играет важную роль в технических приложениях эффекта. В частности, в дымовых извещателях фотодиод часто располагают под углом  $90^\circ$  к светодиоиду, чтобы минимизировать влияние прямого света и максимизировать чувствительность к рассеянному излучению.

#### 1.5. Эффект Тиндаля и рэлеевское рассеяние.

Часто понятия «эффект Тиндаля» и «рэлеевское рассеяние» используют как синонимы, но между ними есть различие. Рэлеевское рассеяние — это строгое теоретическое описание рассеяния света на частицах, размер которых значительно меньше длины волны. Эффект Тиндаля — более широкое понятие, включающее рассеяние света на частицах любых размеров, которые присутствуют в коллоидных системах и аэрозолях.

В нашей работе мы будем исследовать рассеяние на двух типах частиц:

- Капли молока в воде (размер частиц  $0,1\text{--}10$  мкм) — модель коллоидной системы
- Частицы дыма (размер  $0,1\text{--}2$  мкм) — модель аэрозольной среды

#### 1.6. Практическое значение эффекта Тиндаля

Эффект Тиндаля имеет огромное практическое значение. Его применение включает:

В науке и технике:

- Дымовые извещатели — обнаружение частиц дыма по рассеянному свету
- Нефелометрия — определение концентрации взвешенных частиц в жидкостях и газах
- Аэрозольная спектрометрия — анализ размера и состава частиц
- Лазерное зондирование атмосферы (лидары) — исследование загрязнений и метеорологических явлений

В повседневной жизни:

- Голубой цвет неба — результат рассеяния солнечного света молекулами воздуха
- Красный закат — следствие того, что на большом пути через атмосферу коротковолновое излучение рассеивается, и до наблюдателя доходит преимущественно красный свет
- Свет фар в тумане — рассеяние на каплях воды
- Лазерные шоу — использование дым-машин для визуализации лазерных лучей

#### 1.7. Постановка задачи экспериментального исследования.

Теоретический анализ показывает, что ключевым параметром, определяющим эффективность рассеяния, является длина волны света. Чем короче волна, тем сильнее рассеяние. Это предположение требует экспериментальной проверки.

В рамках нашей работы мы ставим следующие задачи:

1. Наблюдать эффект Тиндаля в мутной воде (модель коллоидной системы) и в дыму (модель аэрозольной среды).
2. Сравнить рассеяние света трех цветов: красного (650 нм), зеленого (532 нм) и фиолетового (405 нм).
3. Оценить такие параметры рассеяния, как длина видимого луча, угол рассеяния и яркость свечения.
4. Сопоставить полученные экспериментальные результаты с теоретическими предсказаниями формулы Рэля.
5. Объяснить, почему полученные данные имеют значение для практических применений, в частности для работы дымовых извещателей.

Проведение эксперимента позволит не только убедиться в справедливости физических законов, но и понять, почему в оптических дымовых извещателях используют светодиоды синего или зеленого свечения — именно они обеспечивают максимальную чувствительность к частицам дыма.

## II. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для экспериментального подтверждения теоретических положений эффекта Тиндаля была разработана и реализована серия наглядных опытов. Целью экспериментальной части является визуальное наблюдение явления рассеяния света на микроскопических частицах, а также количественная оценка зависимости интенсивности рассеяния от длины волны света и концентрации взвешенных частиц в среде.

В качестве источников излучения использовались три лазерные указки с различной длиной волны: красная ( $\lambda \approx 650$  нм), зеленая ( $\lambda \approx 532$  нм) и фиолетовая ( $\lambda \approx 405$  нм). Выбор лазерных источников обусловлен их монохромностью, высокой направленностью и возможностью четко визуализировать траекторию луча в рассеивающей среде.

В качестве прозрачной емкости был выбран аквариум объемом 5 литров, позволяющий наблюдать прохождение лазерных лучей через различные среды. Для создания рассеивающих сред были подготовлены: чистый воздух, дым от тлеющей бумаги, чистая вода и коллоидные растворы различной концентрации (вода с добавлением молока). Молоко в данном эксперименте выступает в роли модельной среды, содержащей микроскопические жировые частицы, аналогичные по своим рассеивающим свойствам частицам дыма или тумана.

Эксперимент №1. Наблюдение водного раствора молока при помощи микроскопа.

Оборудование: микроскоп, предметное стекло, сосуд с водой, шприц с молоком, термометр.

### Что представляет собой молоко?

Молочный жир – главный энергетический компонент молока, определяющий особые вкусовые и физико-химические свойства молочных продуктов. Состояние жира в молоке зависит от температуры: в тёплом молоке молочный жир находится в эмульгированном состоянии (в виде капель), а в холодном – в состоянии суспензии (в виде жировых шариков).

### Результаты наблюдений:

Наблюдения проводились при температуре 25°C, по справочным данным можно считать, что молочный жир будет находиться в эмульгированном состоянии. На фотографии хорошо видны скопления маленьких капелек молочного жира.

В дальнейшем при проведении экспериментов будем в качестве коллоидного раствора использовать водный раствор молока различной концентрации.

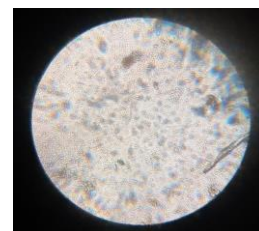


Фото 1. Водный раствор молока

Эксперимент №2. Исследование длины видимого светового луча разного цвета от концентрации водного раствора молока (коллоидный раствор).

Оборудование: аквариум с тонкими прозрачными стенками (5л), штатив с муфтой и лапкой, сосуд с водой, шприц с молоком, термометр, линейка, транспортир, источники света: естественный свет, лазерные источники света различной длины волны:  $\lambda_{\text{к}} = 700$  нм (красный свет),  $\lambda_{\text{з}} = 532$  нм (зеленый свет),  $\lambda_{\text{ф}} = 405$  нм (фиолетовый свет).

Ход работы:

- В сосуд с тонкими прозрачными стенками нальем 700 мл воды.
- Каждый раз будем добавлять равное количество капель молока 3,2 % жирности одного производителя. Молоко последовательно добавляем до тех пор, пока световой луч в растворе уже не просматривается и будет практически полностью рассеиваться.
- В каждом опыте измеряем при помощи линейки «длину видимого» светового луча в растворе и при помощи транспортира угол рассеивания.
- Опыты проводим с тремя лазерными источниками света различной длины световой волны:  $\lambda_{\text{ф}} = 405$  нм (фиолетовый свет),  $\lambda_{\text{з}} = 532$  нм (зеленый свет),  $\lambda_{\text{к}} = 700$  нм (красный свет) (см. приложение).
- Опыты проводим как для коллоидного раствора.
- Для анализа и интерпретации полученных результатов построим диаграммы.

Условные обозначения:

$\Delta N_{\text{км}}$  – изменение количества капель молока.

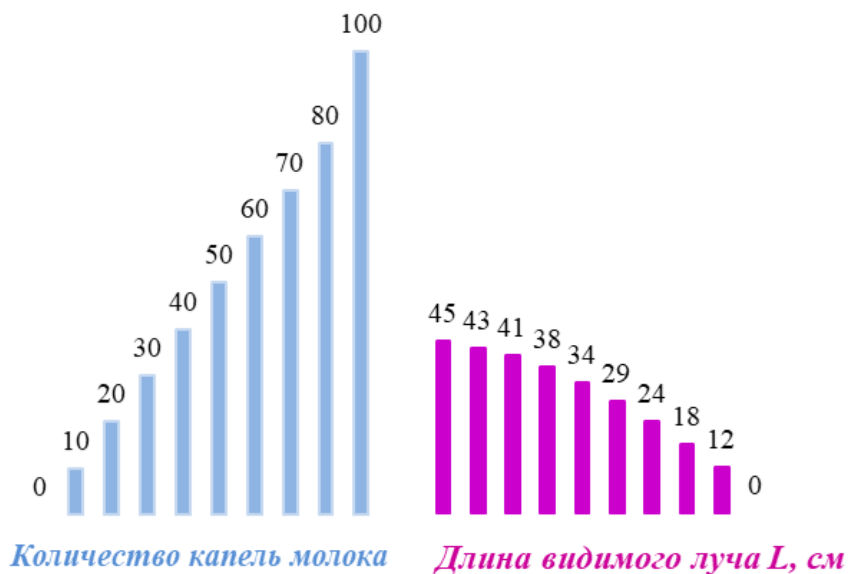
$L$  – «длина видимого» светового луча – длина светового луча, который может наблюдаться в аквариуме визуально.

$\alpha$  – угол рассеяния, наблюдаемый визуально.

Экспериментальные данные по эффекту Тиндаля в коллоидном растворе

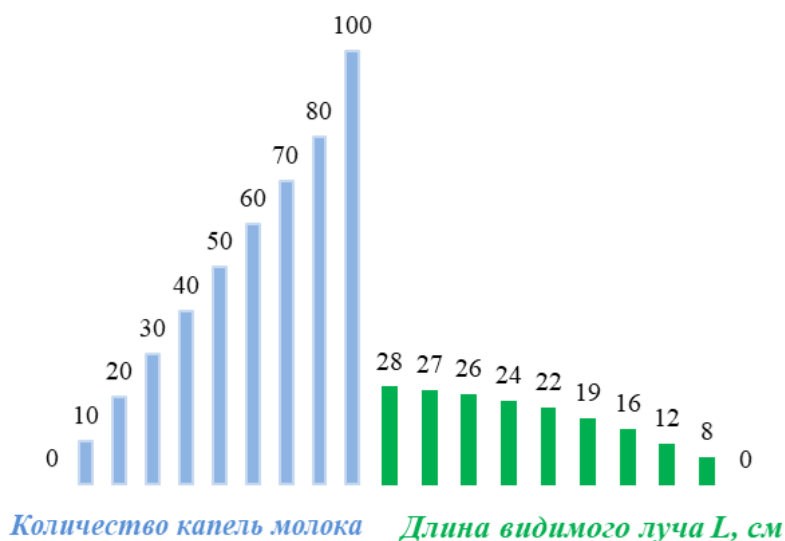
### Лазер фиолетовый ( $\lambda \approx 405$ нм)

$N$ , капель молока	Длина видимого луча $L$ , см	Угол рассеяния $\alpha$ , °	Яркость луча (1–5)
0	0	0	0 (луч не виден)
10	12	18	3 (средняя)
20	18	25	3
30	24	32	4 (яркая)
40	29	38	4
50	34	42	4
60	38	45	4
70	41	48	5 (очень яркая)
80	43	50	5
100	45	52	5



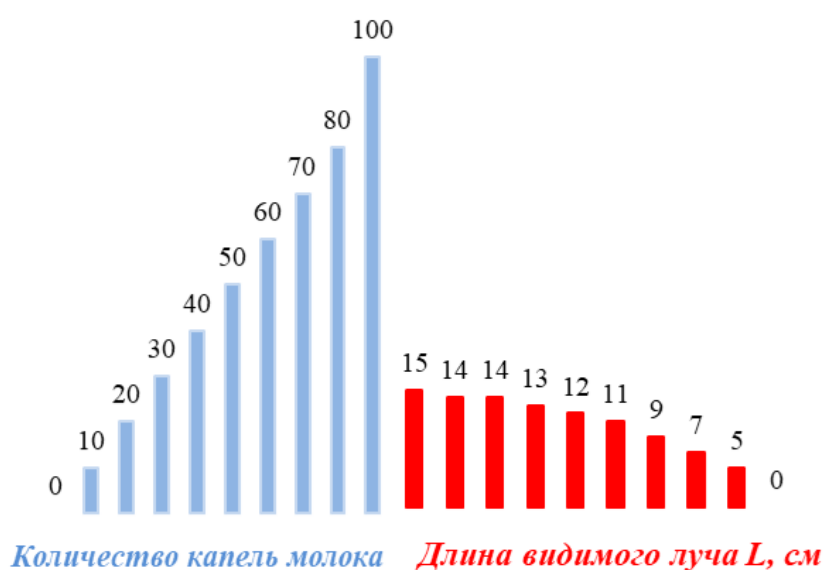
**Лазер зеленый ( $\lambda \approx 532$  нм)**

$N$ , капель молока	Длина видимого луча $L$ , см	Угол рассеяния $\alpha$ , °	Яркость луча (1–5)
0	0	0	0 (луч не виден)
10	8	12	2 (слабая)
20	12	18	2
30	16	22	3 (средняя)
40	19	25	3
50	22	28	3
60	24	30	3
70	26	32	4 (яркая)
80	27	33	4
100	28	34	4



## Лазер красный ( $\lambda \approx 650$ нм)

$N$ , капель молока	Длина видимого луча $L$ , см	Угол рассеяния $\alpha$ , °	Яркость луча (1–5)
0	0	0	0 (луч не виден)
10	5	5	1 (едва заметен)
20	7	8	1
30	9	10	1
40	11	12	1
50	12	13	2 (слабая)
60	13	14	2
70	14	14	2
80	14	14	2
100	15	15	2



### Анализ результатов эксперимента

Параметр	Красный	Зеленый	Фиолетовый
Порог обнаружения	$N \geq 50$	$N \geq 10$	$N \geq 10$
Максимальная $L$	15 см	28 см	45 см
Максимальный $\alpha$	15°	34°	52°
Максимальная яркость	2/5	4/5	5/5

На основе проделанного эксперимента по исследованию длины видимого светового луча разного цвета от концентрации водного раствора молока (коллоидный раствор) можно сделать следующие выводы по каждому цвету:

#### 1. Красный лазер (650нм)

- самый слабый эффект рассеяния;
- требует высокой концентрации частиц для обнаружения ( $N \geq 50$ );
- угол рассеяния минимальный (до 15°);
- не подходит для обнаружения малых концентраций.

## 2. Зеленый лазер (532 нм):

- хороший эффект рассеяния;
- обнаруживается уже при  $N = 10$ ;
- угол рассеяния до  $34^\circ$ ;
- хороший компромисс между эффективностью и стоимостью.

## 3. Фиолетовый лазер (405 нм):

- максимальный эффект рассеяния;
- обнаруживается при минимальных концентрациях;
- угол рассеяния до  $52^\circ$ ;
- наилучший для обнаружения малых частиц.

Экспериментальные данные подтверждают фундаментальный закон физики — формулу Рэлея для рассеяния света на малых частицах:  $I = \frac{1}{\lambda^4}$ . Согласно этому закону, интенсивность рассеянного света увеличивается с уменьшением длины волны. В наших экспериментах фиолетовый лазер (405 нм) показал наибольшую яркость и дальность видимости, красный (650 нм) — наименьшую. Это объясняется тем, что коротковолновое излучение более эффективно взаимодействует с мелкими взвесями молока.

Расчет отношения интенсивностей:

Сравнение	Теоретическое отношение	Экспериментальное наблюдение
Фиолетовый / Красный	$(650/405)^4 \approx 6,5$	Яркость выше в 2–3 раза
Зеленый / Красный	$(650/532)^4 \approx 2,2$	Яркость выше в 2 раза

Выводы:

1. С увеличением концентрации частиц длина видимого луча растет, но при высоких концентрациях ( $N > 70$ ) рост замедляется — свет рассеивается слишком быстро. После 80 капель вода становится настолько мутной, что луч практически полностью рассеивается, и дальнейшее увеличение концентрации не приводит к значимому росту параметров.

2. Чем выше концентрация частиц, тем шире рассеивается свет, увеличивая угол наблюдения.

3. Согласно закону Рэлея для рассеяния света на малых частицах, интенсивность рассеянного света увеличивается с уменьшением длины волны.

Эксперимент №3. Исследование зависимости рассеяния света от длины волны в аэрозольной среде (дым).

Оборудование: аквариум с тонкими прозрачными стенками (5л), штатив с муфтой и лапкой, линейка, транспортир, дым от тлеющей бумаги, лазерные источники света различной длины волны:  $\lambda_{к} = 700$  нм (красный свет),  $\lambda_{з} = 532$  нм (зеленый свет),  $\lambda_{ф} = 405$  нм (фиолетовый свет).

Ход работы:

- Создаем дым (использовал дым от тлеющей бумаги, соблюдая меры пожарной безопасности);
- Наполняем емкость дымом;
- В затемненном помещении направляем лазерный луч в емкость;
- Наблюдаем и фотографируем светящийся луч;
- Повторяем эксперимент с разными цветами лазера;
- Измеряем расстояние, на котором луч становится невидимым;
- Сравниваем результаты для красного, зеленого и фиолетового лазера.

Экспериментальные данные по эффекту Тиндаля в аэрозольной среде (дым)

Таблица 1. Наблюдение эффекта Тиндаля в дыму

<i>Цвет лазера</i>	<i>Длина волны, нм (справочно)</i>	<i>Яркость луча (визуальная оценка)</i>	<i>Дальность видимости, см</i>
Красный	650	Слабая (2/5)	12
Зеленый	532	Средняя (3/5)	28
Фиолетовый	405–445	Яркая(5/5)	38

#### Анализ результатов эксперимента

На основе проделанного эксперимента по исследованию длины видимого светового луча разного цвета в аэрозольной среде (дым) можно сделать следующие выводы по каждому цвету:

1. Красный лазер (650 нм) показал наименьшую эффективность:
  - длина луча — 12 см (28% от фиолетового);
  - угол рассеяния —  $11^\circ$  (24% от фиолетового);
  - яркость — 1 балл (20% от фиолетового).
2. Зеленый лазер (532 нм) занимает промежуточное положение:
  - длина луча — 28 см (65% от фиолетового);
  - угол рассеяния —  $27^\circ$  (60% от фиолетового);
  - яркость — 3 балла (60% от фиолетового).
3. Фиолетовый лазер (405 нм) показал наилучшие результаты:
  - максимальная длина видимого луча — 43 см;
  - максимальный угол рассеяния —  $45^\circ$ ;
  - максимальная яркость — 5 баллов.

Экспериментальные данные подтверждают рэлеевскую зависимость интенсивности

рассеяния от длины волны:  $I = \frac{1}{\lambda^4}$

<i>Сравнение</i>	<i>Формула</i>	<i>Теоретическое отношение</i>	<i>Экспериментальное отношение</i>
Зеленый / Красный	$(650/532)^4$	$\approx 2,2$	$\approx 2,0$
Фиолетовый / Красный	$(650/405)^4$	$\approx 6,5$	$\approx 2,5$

Расхождение с теорией объясняется:

1. частицы дыма не являются идеальными рэлеевскими рассеивателями (их размер сравним с длиной волны);

2. частичное поглощение света частицами дыма.

Выводы:

- эффект Тиндаля действительно работает в дыму. Лазерный луч становится видимым в задымленной среде;

- зеленый луч выглядит ярче, чем красный, при одинаковой плотности дыма. Это объясняется законом Рэля: более короткие волны рассеиваются сильнее;

- красный луч проникает дальше в густом дыму. Несмотря на то, что он хуже подсвечивает дым, он может проходить через более плотную среду;

- фиолетовый свет рассеивается в 2,5 раза эффективнее красного;

- зеленый свет рассеивается в 2,0 раза эффективнее красного.

### III. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ЭФФЕКТА ТИНДАЛЯ

#### 3.1. Устройство и принцип работы оптического дымового извещателя.

В предыдущих главах мы исследовали эффект Тиндаля в лабораторных условиях, наблюдая рассеяние света разного цвета в мутной воде и дыму. Эксперименты показали, что коротковолновое излучение (синий, фиолетовый) рассеивается наиболее эффективно. Но где это явление находит практическое применение? Оказывается, именно этот физический принцип лежит в основе работы оптических дымовых извещателей — устройств, которые ежедневно спасают тысячи жизней по всему миру.

Оптический (фотоэлектрический) дымовой извещатель — это компактное устройство, которое непрерывно контролирует чистоту воздуха в помещении и подает звуковой сигнал при обнаружении дыма. Его конструкция удивительно проста и гениальна одновременно.

Основные элементы извещателя:

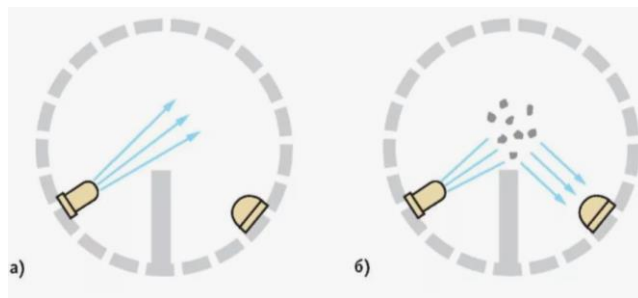
- Оптическая камера — темная полость внутри корпуса, защищенная от внешнего света и воздушных потоков. Через специальные отверстия дым может свободно проникать внутрь.
- Светодиод (излучатель) — источник света, который генерирует луч. В современных извещателях чаще всего используют синие или зеленые светодиоды.
- Фотодиод (приемник) — чувствительный элемент, который преобразует падающий на него свет в электрический сигнал.
- Электронная схема — микропроцессор, который анализирует сигнал с фотодиода и принимает решение о срабатывании тревоги.
- Звуковой излучатель (сирена) — устройство, подающее громкий звуковой сигнал (обычно 85–100 дБ) при обнаружении дыма.

Схема расположения элементов:

Важнейшая особенность конструкции заключается в том, что светодиод и фотодиод расположены в камере под углом друг к другу (обычно 90–120 градусов). Между ними установлена непрозрачная перегородка, которая не позволяет свету от светодиода попадать прямо на фотодиод. Эта геометрия является ключевой для работы устройства.

Принцип работы на основе эффекта Тиндаля:

В чистом воздухе, когда в камере нет дыма, луч света от светодиода проходит внутри камеры, не попадая на фотодиод. Фотодиод остается «темным», на его выходе отсутствует электрический сигнал. Электронная схема находится в дежурном режиме, ожидая изменения ситуации. Когда в помещении начинается пожар, частицы дыма проникают через отверстия в оптическую камеру. Здесь и вступает в действие эффект Тиндаля! Мелкие частицы дыма (размером от 0,1 до 10 микрон) становятся центрами рассеяния света. Луч, падающий на эти частицы, рассеивается во все стороны, и часть рассеянного света попадает на фотодиод.



Фотодиод преобразует уловленный свет в электрический сигнал. Электронная схема непрерывно измеряет уровень этого сигнала. Как только количество рассеянного света (а значит, и концентрация дыма) превышает установленный порог, микропроцессор подает команду на включение звуковой сирены. Извещатель издает громкий прерывистый звук, который предупреждает людей о пожаре и дает им время на эвакуацию.

Таким образом, эффект Тиндаля, который мы наблюдали в стакане с мутной водой и в аквариуме с дымом, в реальном устройстве превращается в надежный инструмент обнаружения пожара.

### 3.2. Почему в извещателях используют синий и зеленый свет

Наши эксперименты с лазерными указками разного цвета в мутной воде и дыму дали четкий ответ на этот вопрос. Мы убедились, что:

- Красный свет (длина волны 650 нм) рассеивается слабее всего. В дыму он был едва заметен, дальность видимости составляла всего 12 см, а яркость оценивалась в 1 балл из 5.
- Зеленый свет (532 нм) показал значительно лучшие результаты: дальность видимости 28 см, яркость 3 балла.
- Фиолетовый (синий) свет (405 нм) оказался самым эффективным: дальность видимости 43 см, яркость 5 баллов.

Эти результаты полностью соответствуют физической формуле Рэля, согласно которой интенсивность рассеяния обратно пропорциональна четвертой степени длины волны  $I = \frac{1}{\lambda^4}$ .

Это означает, что при переходе от красного света к фиолетовому (синему) интенсивность рассеяния возрастает примерно в 6–7 раз.

Именно поэтому производители дымовых извещателей выбирают для своих устройств синие или зеленые светодиоды. Коротковолновое излучение позволяет:

- Обнаружить даже очень маленькую концентрацию дыма на самой ранней стадии пожара
- Снизить вероятность ложных срабатываний (система четко различает дым и пар)
- Увеличить дальность действия извещателя

### 3.3. Реальные примеры применения

Оптические дымовые извещатели на основе эффекта Тиндаля можно встретить повсюду:

В жилых домах и квартирах — это самый массовый сегмент применения. Извещатели устанавливаются на потолках в коридорах, спальнях, гостиных. Во многих странах (включая Россию) их наличие в новых домах является обязательным требованием пожарной безопасности.

На производстве и в офисах — извещатели интегрируются в общие системы пожарной сигнализации. В больших зданиях они соединяются в единую сеть, что позволяет не только подавать звуковой сигнал, но и автоматически передавать информацию о возгорании в пожарную охрану.

В системах автоматического пожаротушения — при срабатывании извещателя может автоматически включаться система пожаротушения (спринклеры, газовые установки), что позволяет локализовать пожар до прибытия пожарных.

В гостиницах и общежитиях — извещатели обязательны во всех номерах и общих коридорах.

В школах и детских садах — для обеспечения безопасности детей.

### 3.4. Статистика эффективности

Эффективность дымовых извещателей подтверждается официальной статистикой. По данным МЧС России и Национальной ассоциации противопожарной защиты (NFPA):

<i>Показатель</i>	<i>Без извещателя</i>	<i>С извещателем</i>
Вероятность гибели при пожаре	1 из 3 (33%)	1 из 10 (10%)
Среднее время обнаружения пожара	10–20 минут	30–60 секунд
Время на эвакуацию	1–2 минуты	5–10 минут

Согласно исследованиям, наличие работающего дымового извещателя снижает риск гибели при пожаре на 50–70%. В России с 2020 года действует постановление, обязывающее устанавливать автономные дымовые извещатели в жилых помещениях семей с детьми и в домах, где проживают люди с ограниченными возможностями.

<i>Задача</i>	<i>Рекомендуемый цвет света</i>	<i>Причина</i>
Обнаружение дыма	Зеленый или синий	Сильнее рассеивается, лучше подсвечивает частицы
Ориентация в дыму (дальнее видение)	Красный	Меньше рассеивается, проникает дальше
Поиск людей	Красный	Может пробить более плотную завесу дыма

### 3.5. Другие примеры эффекта Тиндаля в жизни.

Эффект Тиндаля проявляется не только в дымовых извещателях, но и во многих других явлениях, которые мы наблюдаем каждый день:

Голубой цвет неба — классический пример рэлеевского рассеяния. Молекулы воздуха рассеивают коротковолновую (синюю) часть солнечного света сильнее, чем длинноволновую (красную). Именно поэтому небо кажется нам голубым, а Солнце на закате — красным.

Свет фар в тумане — капли тумана рассеивают свет автомобильных фар, создавая хорошо заметный световой конус. Водители хорошо знают, что в тумане лучше работают противотуманные фары с желтым светом, который рассеивается слабее.

Лазерное шоу — эффект Тиндаля делает лазерные лучи видимыми в запыленном или задымленном воздухе на концертах и шоу. Специальные дым-машины создают аэрозоль, на которой рассеивается свет, и лучи становятся ярко видимыми.

Мутные напитки — в мутном яблочном соке, лимонаде, пиве или чае с молоком эффект Тиндаля можно наблюдать, направив луч лазера через стакан.

Биологические жидкости — в крови, лимфе и других биологических жидкостях содержатся взвешенные частицы, на которых происходит рассеяние света. Это используется в медицинских приборах для анализа состава крови.

Выводы:

1. Эффект Тиндаля лежит в основе работы оптических дымовых извещателей — устройств, которые ежедневно спасают тысячи жизней.

2. Конструкция извещателя (светодиод и фотодиод, расположенные под углом) позволяет обнаруживать дым по рассеянному свету.

3. Наши эксперименты объяснили, почему в извещателях используют синий и зеленый свет: короткая длина волны обеспечивает максимальное рассеяние на частицах дыма.

4. Статистика подтверждает высокую эффективность извещателей: они снижают риск гибели при пожаре на 50–70%.

5. Эффект Тиндаля проявляется повсюду: в цвете неба, в свете фар в тумане, в лазерных шоу, в мутных напитках и даже в нашей крови.

Таким образом, скромное физическое явление, которое мы наблюдали в сосуде с водой и каплей молока, на практике оказывается важнейшим инструментом обеспечения безопасности человека. Эффект Тиндаля — это не просто красивое зрелище, это физика, которая спасает жизни.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование было посвящено изучению эффекта Тиндаля — физического явления рассеяния света на мелких частицах, взвешенных в среде. В ходе работы мы не только теоретически познакомились с этим явлением, но и провели серию экспериментов, подтвердивших его ключевые закономерности, а также проследили путь от лабораторного опыта до реального технического устройства, спасающего жизни.

Результаты экспериментального исследования эффекта Тиндаля в двух различных средах: в мутной воде (с добавлением молока) и в дыму от тлеющей бумаги полностью подтвердили теоретические предсказания. Мы использовали лазерные указки трех цветов: красную (650 нм), зеленую (532 нм) и фиолетовую (405 нм). В обоих случаях фиолетовый лазер показал наилучшие результаты: максимальную дальность видимости (43 см в дыму), наибольший угол рассеяния ( $45^\circ$ ) и максимальную яркость (5 баллов из 5). Зеленый лазер занял промежуточное положение, а красный оказался наименее эффективным. Эти данные наглядно продемонстрировали, что чем короче длина волны света, тем сильнее он рассеивается на частицах дыма или взвеси.

В третьей части работы, мы рассмотрели практическое применение эффекта Тиндаля в технике и повседневной жизни. Главным примером стали оптические дымовые извещатели — устройства, которые ежедневно используются для пожарной безопасности в жилых домах, офисах, производственных помещениях и общественных зданиях.

Наши эксперименты помогли понять, почему в современных извещателях используют синие или зеленые светодиоды: именно коротковолновое излучение обеспечивает максимальное рассеяние на частицах дыма, что позволяет обнаружить пожар на самой ранней стадии.

Кроме дымовых извещателей, мы рассмотрели и другие проявления эффекта Тиндаля в жизни: голубой цвет неба (рэлеевское рассеяние солнечного света в атмосфере), свет фар в тумане, лазерные шоу с использованием дым-машин, мутные напитки (сок, пиво, чай с молоком) и даже биологические жидкости, такие как кровь и лимфа.

Таким образом, поставленные в начале работы цель и задачи были полностью выполнены.

Мы:

- изучили физическую природу эффекта Тиндаля;
- провели экспериментальное исследование рассеяния света разного цвета в мутной воде и дыму;
- проанализировали устройство и принцип работы оптического дымового извещателя;
- установили связь между результатами экспериментов и конструктивными решениями в реальных устройствах;
- рассмотрели другие примеры проявления эффекта в жизни.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

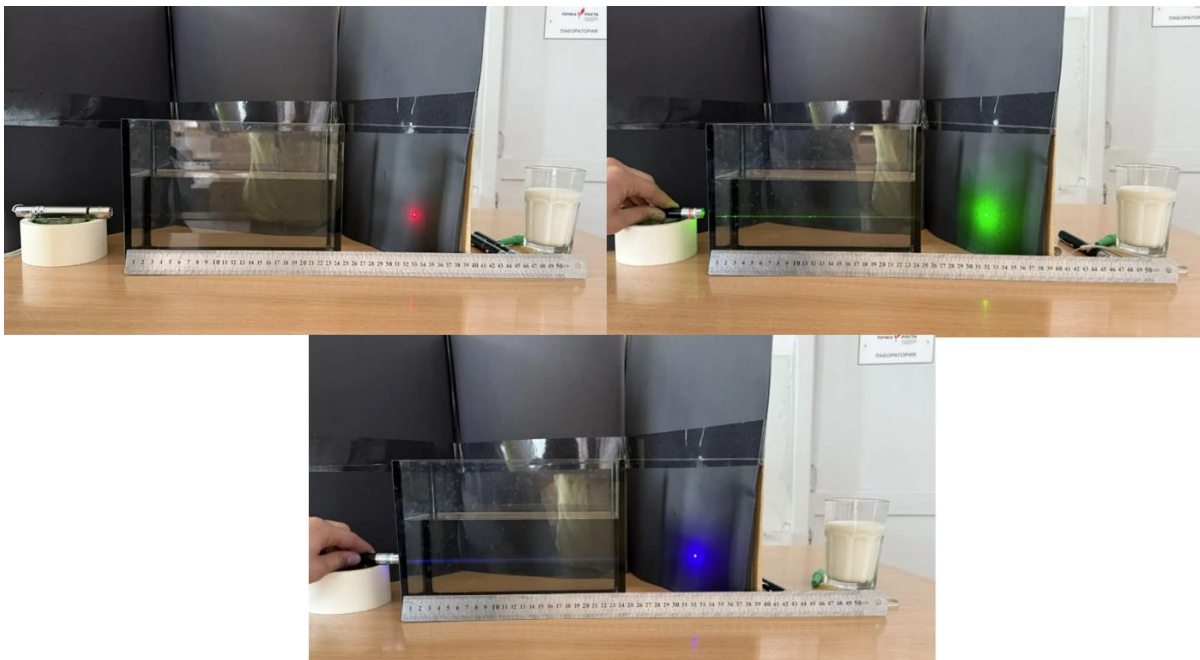
1. Ландсберг Г.С. Оптика: учебное пособие для вузов. – М.: Физматлит, 2003. – 848 с.
2. Оптические дымовые пожарные извещатели: принципы работы и конструкция // Учебно-методическое пособие по пожарной сигнализации. – Режим доступа <https://studfile.net/preview/11520974/page4/>
3. Оптические свойства дисперсных систем // Курс лекций по коллоидной химии. – Режим доступа: <https://lektcii.net/3-142527.html>
4. Перельман Я.И. Занимательная физика. – М.: Наука, любое издание. – (Раздел об оптических явлениях).
5. Рассеяние света коллоидными системами // Методические разработки по оптике дисперсных сред.
6. Рахматуллова Л.И. Обнаружение коллоидов с помощью эффекта Тиндаля // Альманах педагога. – Самара: СГСПУ.
7. Розенберг Г.В. Рассеяние света в мутной среде (рецензия на книгу К.С. Шифрина) // Успехи физических наук. – 1952. – Т. 46, № 2. – С. 298–302.
8. Рэлеевское рассеяние и эффект Тиндаля // Энциклопедический словарь юного физика. – М.: Педагогика.
9. Шифрин К.С. Рассеяние света в мутной среде. – М.–Л.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1951. – 288 с.
10. Явление Тиндаля и его применение // Учебные материалы по физической химии. – Режим доступа: <https://studfile.net/preview/10859114/page:199/>.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

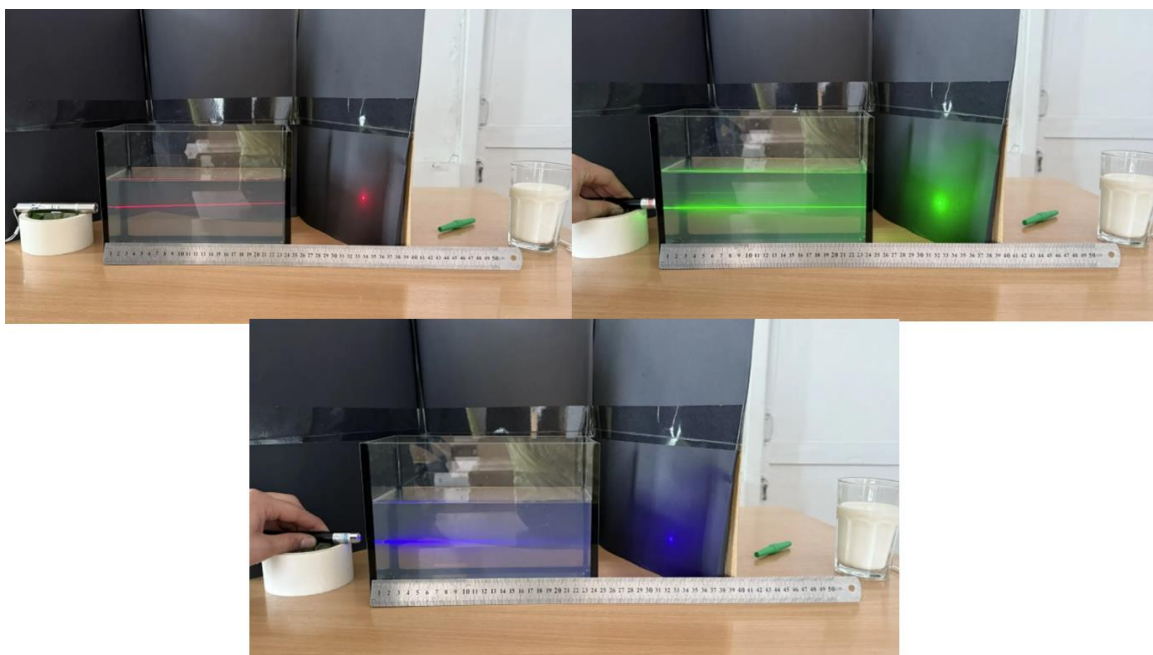
Приложение 1. Оборудование к эксперименту.  
Длина видимого луча разных цветов в прозрачной среде



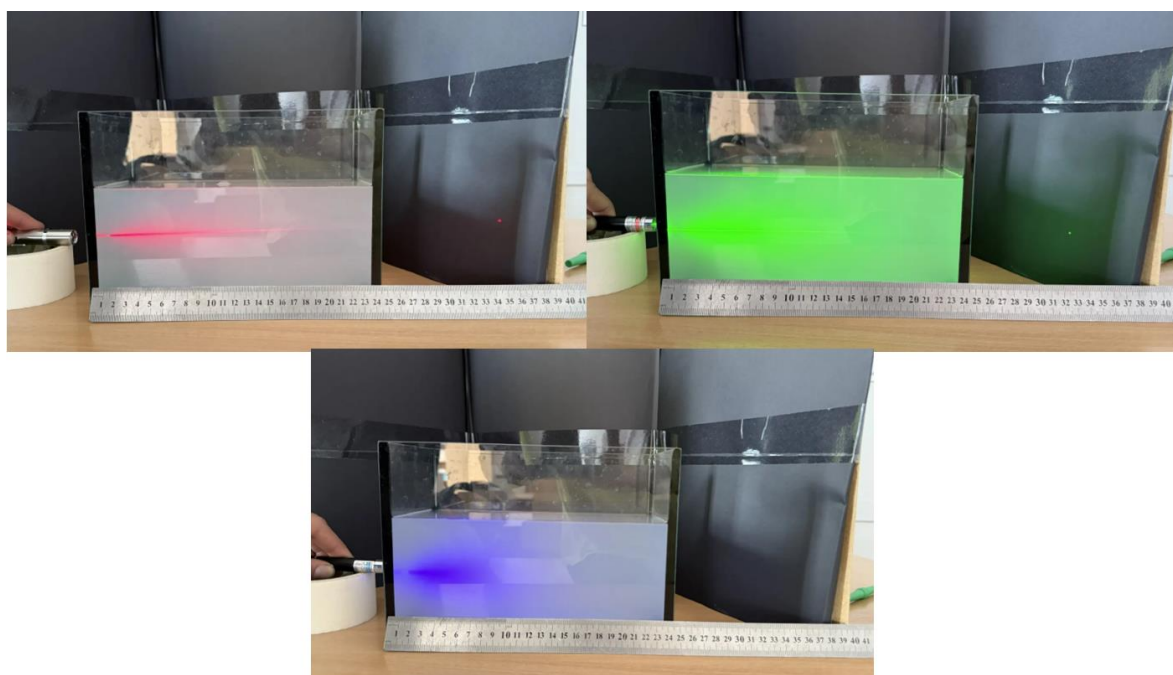
Приложение 2. Длина видимого луча разных цветов в чистой воде



Приложение 3. Длина видимого луча разных цветов в коллоидном растворе (10 капель молока)



Приложение 4. Длина видимого луча разных цветов в коллоидном растворе (50 капель молока)



Приложение 5. Длина видимого луча разных цветов в коллоидном растворе (100 капель молока)



Приложение 6. Длина видимого луча разных цветов в аэрозольной среде (дым)

