

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО  
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ

МОСКОВСКИЙ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

ФИЗТЕХ-ШКОЛА ЭЛЕКТРОНИКИ, ФОТОНИКИ И  
МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКИ

ОТЧЁТ О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

# Определение оптических свойств мутных сред с помощью подвижных интегрирующих сфер

выполнили студенты 654а группы ФЭФМ

Карпова Татьяна  
Смирнов Артур

Фрязино, 2020 г.

# Содержание

<b>1</b>	<b>Цель работы</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Описание экспериментальной установки</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Порядок проведения эксперимента</b>	<b>3</b>
3.1	Подготовка исследуемых образцов . . . . .	3
3.2	Измерение отклика фотодетекторов . . . . .	3
3.3	Определение вспомогательных коэффициентов . . . . .	3
3.4	Обработка экспериментальных данных . . . . .	3
<b>4</b>	<b>Результаты измерений и определение оптических свойств</b>	<b>4</b>
4.1	Зависимость коэффициента $C_3$ от диаметра диафрагмы . . . . .	4
4.2	Результаты математического моделирования . . . . .	5
<b>5</b>	<b>Вывод</b>	<b>5</b>

# 1 Цель работы

Определение оптических свойств (коэффициент рассеяния  $\mu_s$ , коэффициент поглощения  $\mu_a$ , анизотропия рассеяния  $g$ , показатель преломления  $n$ ) различных мутных сред (майонез 67% жирности, смесь воды и коровьего молока 3.2% жирности, раствор Липофундина 10% в желатине)

## 2 Описание экспериментальной установки

Схема установки для определения оптических свойств мутных сред представлена на рис. 1.

Одномодовое лазерное излучение с длиной волны 580 нм, шириной пучка 2 см и регулируемой мощностью  $P_{las}$  попадает на стеклянную призму. Отраженное от призмы излучение  $P_{cat}$  регистрируется измерителем мощности. Прошедший через призму пучок модулируется оптическим прерывателем с частотой 128 Гц и падает на диафрагму (D1) диаметром  $d$ . Далее пучок заводится непосредственно на измерительную систему с образцом и интегрирующими сферами, предварительно проходя через диафрагму D2. Мощность лазерного излучения у границы образца обозначается как  $P_{in}$ .

Исследуемый образец расположен на платформе, которую можно перемещать между интегрирующими сферами, тем самым изменяя расстояния от поверхности образца до входов сфер. Интенсивность света при прохождении через образец и при отражении от него изменяется; по измеренным значениям пропускания и отражения можно определить оптические свойства образца. Интегрирующие сферы IS1 и IS2 покрыты слоем отражающего покрытия (сульфид бария  $BaSO_4$ , коэффициент отражения на длине волны 600 нм составляет 98.22%). К сферам присоединены фотодетекторы, сигнал с которых передаётся на синхронный детектор. Также на синхронный детектор подаётся опорный сигнал с оптического прерывателя.

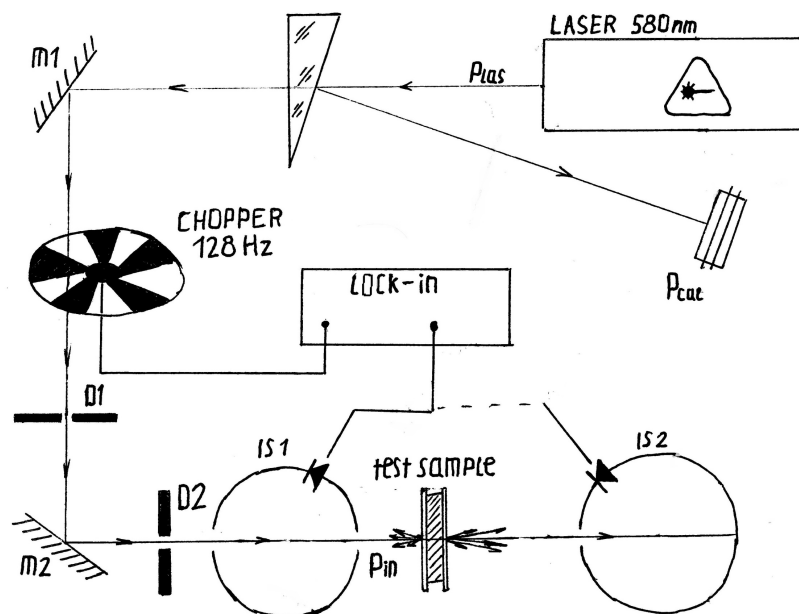


Рис. 1: Установка для определения оптических свойств мутных сред

## 3 Порядок проведения эксперимента

### 3.1 Подготовка исследуемых образцов

Для исследования с помощью подвижных интегрирующих сфер вещества с различными оптическими свойствами помещаются между двумя предметными стёклами. Толщину образца при изготовлении можно регулировать, подкладывая между предметными стёклами одно или несколько покровных стёкол.

### 3.2 Измерение отклика фотодетекторов

Для каждого исследуемого образца проводится две серии измерений (регистрация отражённого образцом излучения сферой  $IS1$  и прошедшего сквозь образец излучения сферой  $IS2$ ). С периодичностью в 30 секунд расстояние от входа интегрирующей сферы до образца изменяется вручную на 4 мм, начиная от 0 мм (образец вплотную придвинут к сфере) и заканчивая 36 мм; в конце эксперимента регистрируются показания приборов в положении, когда вход сферы и поверхность образца отодвинуты друг от друга на расстояние порядка 100 мм. Во время эксперимента непрерывно снимаются показания фотодетектора, присоединённого к используемой интегрирующей сфере (показания синхронного детектора  $U_{pd}^{lower}$  для интегрирующей сферы  $IS1$ , далее – нижняя интегрирующая сфера; и  $U_{pd}^{upper}$  для интегрирующей сферы  $IS2$ , далее – верхняя интегрирующая сфера). Также для учета временной нестабильности выходной мощности используемого лазера в ходе эксперимента постоянно измеряется значение мощности  $P_{cal}$ .

### 3.3 Определение вспомогательных коэффициентов

Основной целью измерений является определение зависимости коэффициентов пропускания  $T$  и отражения  $R$  исследуемого образца от расстояния между образцом и входом интегрирующей сферы. Коэффициенты  $T = \frac{P_{pd}^{upper}}{P_{in}}$  и  $R = \frac{P_{pd}^{lower}}{P_{in}}$  нельзя измерить непосредственно, поэтому в эксперименте они определяются косвенно по результатам измерений  $U_{pd}^{lower}$ ,  $U_{pd}^{upper}$  и  $P_{cal}$  с учётом вспомогательных коэффициентов  $C_1 = \frac{P_{in}}{U_{pd}}$ ,  $C_2 = \frac{P_{las}}{P_{cal}}$  и  $C_3 = \frac{P_{in}}{P_{las}}$  (см. формулу (1)).

$$\frac{P_{pd}}{P_{in}} = \frac{U_{pd} \frac{P_{in}}{U_{pd}}}{P_{cal} \frac{P_{las}}{P_{cal}} \frac{P_{in}}{P_{las}}} = \frac{U_{pd} C_1}{P_{cal} C_2 C_3} \quad (1)$$

Коэффициент  $C_1$  отвечает за эффективность регистрации излучения интегрирующей сферой (и, вообще говоря, разный для двух используемых в эксперименте сфер); величина, обратная  $C_2$ , показывает, какая часть лазерного излучения отражается от призмы в первом отсеке установки. Коэффициент  $C_3$  определяет потери мощности при прохождении излучения от выхода лазера до поверхности образца, эта величина зависит от диаметра  $d$  диафрагмы  $D1$ .

Значения коэффициентов  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  зависят от параметров установки (например, значение  $C_2$  зависит от расположения измерительной головы относительно призмы), а также от различных внешних факторов (температура в помещении, время работы лазера), и поэтому в идеале измеряются непосредственно перед каждым экспериментом.

Все значения мощности лазерного излучения ( $P_{las}$ ,  $P_{cal}$ ,  $P_{in}$ ), необходимые для вычисления коэффициентов, определялись с помощью измерителя мощности; значения  $U_{pd}$  определялись по показаниям синхронного детектора.

### 3.4 Обработка экспериментальных данных

Обработка массивов экспериментальных данных проводится с помощью программы, написанной в среде Wolfram Mathematica. Для каждого временного отрезка (и, соответственно,

для каждого расстояния от границы образца до входа интегрирующей сферы) вычисляются медианы всех измеренных значений  $U_{pd}$  и  $P_{cal}$ . Далее по формуле (1) пересчитываются коэффициенты  $R$  и  $T$ . Наконец, строятся зависимости  $R(z)$  и  $T(z)$ .

## 4 Результаты измерений и определение оптических свойств

В период с 11.02.20 по 04.03.20 было проведено несколько экспериментов по определению коэффициентов пропускания и отражения различных образцов. Параметры образцов приведены в таблице 1. Толщина предметных стёкол равнялась 1.066 мм и 1.053 мм. Было проведено математическое моделирование распространения излучения через образцы (см. пункт 4.2), по результатам моделирования оценены оптические свойства образцов.

Таблица 1: Эксперименты и исследуемые образцы

№	Дата	Вещество	Толщина
1	11.02.20	Майонез 67%	$d_{1.1} = 0.83$ мм
2	18.02.20	Майонез 67%	$d_{2.1} = 0.34$ мм
			$d_{2.2} = 0.48$ мм
			$d_{2.3} = 0.66$ мм
3	25.02.20	Молоко 3.2% + вода	$d_{3.1} = 1.09$ мм
			$d_{3.2} = 1.58$ мм
			$d_{3.3} = 0.49$ мм
4	04.03.20	Липофундин 10% + желатин	$d_{3.1} = 0.19$ мм
			$d_{3.2} = 0.37$ мм
			$d_{3.3} = 0.49$ мм

### 4.1 Зависимость коэффициента $C_3$ от диаметра диафрагмы

В эксперименте №1 помимо зависимостей  $R(z)$  и  $T(z)$  измерялась также зависимость вспомогательного коэффициента  $C_3$  от диаметра  $d$  диафрагмы  $D1$ . Результаты соответствующих измерений приведены в таблице 2.

Таблица 2: Зависимость величины коэффициента  $C_3$  от диаметра диафрагмы  $D1$

$d$ , мм	5.05	1	2.35	3.7
$C_3$	0.067	0.002	0.015	0.050

Значения коэффициентов  $C_1$  и  $C_2$  в первом эксперименте:

$$C_1^{upper} = 37.8 \text{ Вт/В} \quad C_1^{lower} = 38.7 \text{ Вт/В}$$

$$C_2 = 56.1$$

Графики зависимости  $R(z)$  и  $T(z)$  для одного образца при различных значениях диаметра диафрагмы с учётом изменения коэффициента  $C_3$  приведены на рис. 2. Графики практически идентичны; это позволяет сказать, что результат эксперимента не зависит от диаметра диафрагмы  $D1$  при условии, что для конкретного диаметра измерен коэффициент  $C_3$ .

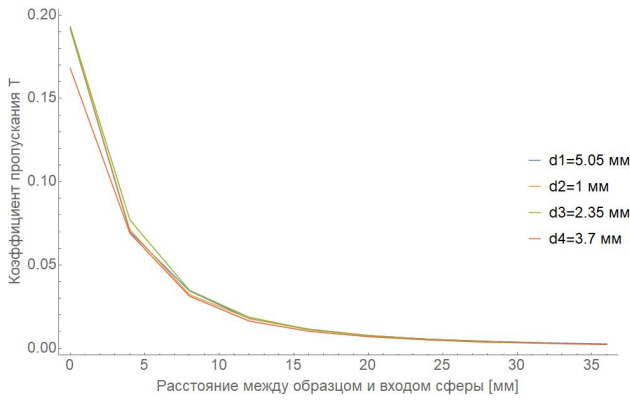


Рис. 2: Зависимость коэффициента пропускания от расстояния между образцом и входом сферы при различных диаметрах диафрагмы  $D1$

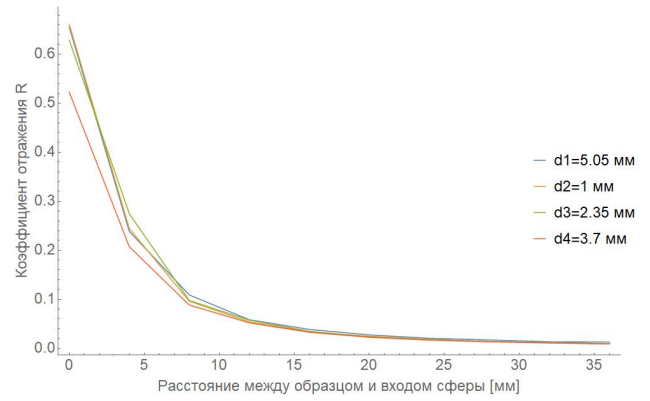


Рис. 3: Зависимость коэффициента отражения от расстояния между образцом и входом сферы при различных диаметрах диафрагмы  $D1$

## 4.2 Результаты математического моделирования

Математическое моделирование распространения света в образце проводилось методом Монте-Карло и методом сложения-удвоения (adding-doubling). Решалась прямая задача – построение зависимостей коэффициентов отражения и пропускания от расстояния между входом сферы и образцом по известным коэффициентам рассеяния  $\mu_s$  и поглощения  $\mu_a$ , анизотропии рассеяния  $g$  и показателю преломления  $n$ . Для каждого образца эти параметры подбирались так, чтобы зависимость  $T(z)$ , полученная в результате моделирования, совпала с измеренной в эксперименте. Также необходимо было, чтобы для каждого вещества набор  $\mu_s$ ,  $\mu_a$ ,  $g$  и  $n$  не зависел от толщины образца.

Необходимо отметить, что при моделировании методом Монте-Карло не учитывалось наличие предметных стёкол, граничащих с образцом. Значения коэффициентов, полученные этим методом, оказались меньше тех, что были получены при использовании метода сложения-удвоения (где наличие предметных стёкол было учено).

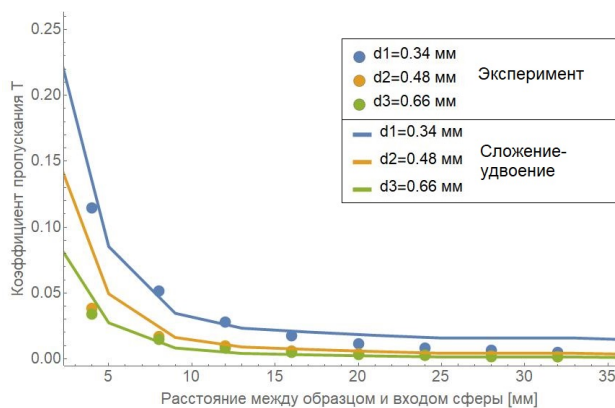
Графики зависимостей  $T(z)$  для различных образцов, полученные экспериментально и при помощи математического моделирования, приведены на рис. 4. Полученные в результате моделирования значения  $\mu_s$ ,  $\mu_a$ ,  $g$  и  $n$  приведены в таблице 3.

Таблица 3: Оптические свойства образцов, определённые с помощью математического моделирования (AD – метод сложения-удвоения, MC – метод Монте-Карло)

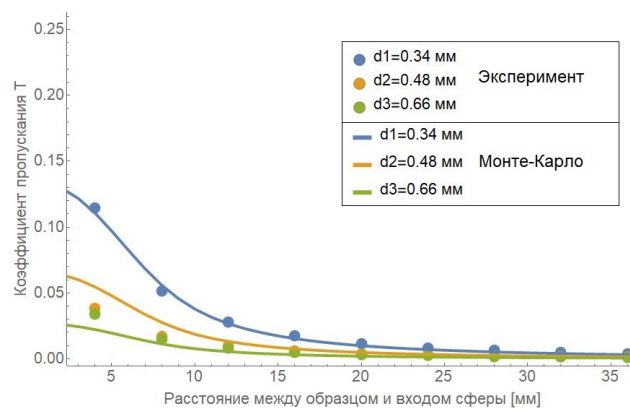
	$\mu_s, \text{м}^{-1}$		$\mu_a, \text{м}^{-1}$		$g$		$n$	
Вещество	AD	MC	AD	MC	AD	MC	AD	MC
Майонез 67%	13000	25000	700	800	0.6	0.6	1.4	1.4
Раствор молока 3.2%	2370	2350	180	180	0.55	0.55	1.4	1.34
Раствор Липофундина 10%	6000	6300	850	930	0.8	0.4	1.26	1.26

## 5 Вывод

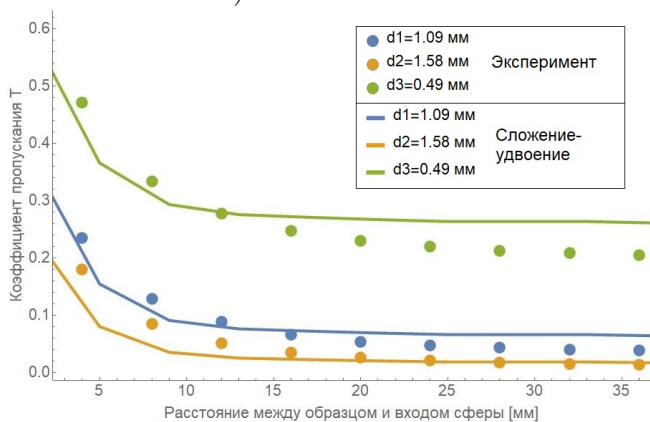
Метод подвижных интегрирующих сфер позволяет оценить порядок коэффициентов поглощения и рассеяния. Для получения более точных результатов необходимо реализовать решение обратной задачи методом сложения-удвоения, а также учесть наличие предметных стёкол вокруг образца при вычислениях методом Монте-Карло.



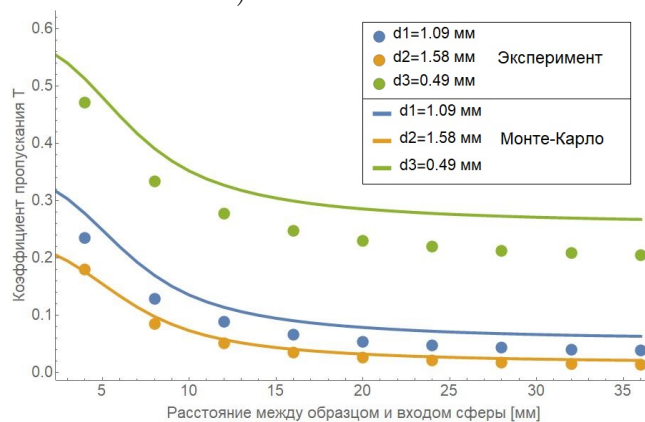
а) Майонез 67%



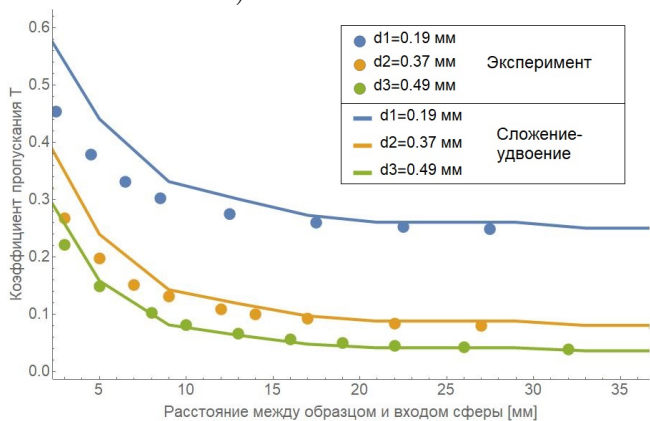
б) Майонез 67%



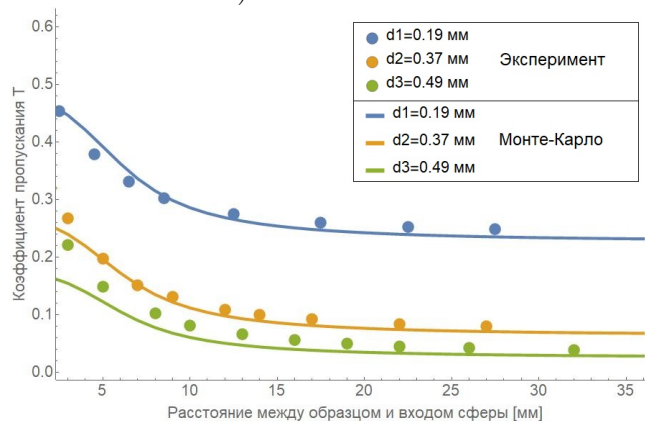
в) Молоко 3.2%



г) Молоко 3.2%



д) Липофундин 10%



е) Липофундин 10%

Рис. 4: Сравнение экспериментальных и смоделированных зависимостей коэффициентов пропускания образцов различной толщины от расстояния между образцом и входом сферы. На графиках а) и б) изображены зависимости для майонеза 67%, на в) и г) – для раствора молока 3.2%, на д) и е) – для раствора Липофундина 10%. На графиках а), в) и д) экспериментальные зависимости сравниваются с зависимостями, полученными с помощью математического моделирования методом сложения-удвоения; на графиках б), г) и е) – с зависимостями, полученными с помощью метода Монте-Карло