

ISSN 2712-8326



# *НАУКА ONLINE* *SCIENCE ONLINE*

Электронный научный журнал  
№ 2 (15) | 2021

<http://nauka-online.ru/>

НАУКА ONLINE, № 2 (15), 2021.

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ЭЛ № ФС 77 – 75253 от 01.04.2019 г. выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

ISSN 2712-8326

Выходит 4 раза в год.

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова».

Главный редактор: К. К. Алтунин.

Адрес редакции: Россия, 432071, г. Ульяновск, площадь Ленина, д. 4/5.

Официальный сайт: <http://nauka-online.ru/>

E-mail: nauka\_online@ulspu.ru

---

Science online, issue 2 (15), 2021.

The certificate of registration of the mass media EL No. FS 77 – 75253 dated 01.04.2019 was issued by the Federal Service for Supervision in the Sphere of Communications, Information Technology and Mass Media (Roskomnadzor).

ISSN 2712-8326

Published 4 times a year.

Founder: Ulyanovsk State Ulyanov Pedagogical University.

Editor-in-chief: K. K. Altunin.

Editorial office address: Russia, 432071, Ulyanovsk, Lenin Square, 4/5.

Official site: <http://nauka-online.ru/>

E-mail: nauka\_online@ulspu.ru

## Редакционная коллегия

Главный редактор — Алтунин Константин Константинович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики и технических дисциплин ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова».

Артемьева Елена Александровна, доктор биологических наук, профессор кафедры географии и экологии ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова».

Демин Максим Викторович, кандидат физико-математических наук, директор департамента по научной работе Балтийского федерального университета имени И. Канта, г. Калининград.

Идрисов Ринат Галимович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математического моделирования Стерлитамакского филиала ФГБОУ ВО «Башкирский государственный университет».

Капитанчук Василий Вячеславович, кандидат технических наук, доцент кафедры информатики Ульяновского института гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б. П. Бугаева.

Медетов Нурлан Амирович, доктор физико-математических наук, декан факультета информационных технологий Костанайского государственного университета имени А. Байтурсынова, г. Костанай, республика Казахстан.

Пестова Наталия Юрьевна, кандидат химических наук, доцент кафедры биологии и химии ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова».

Пырова Светлана Александровна, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры биологии и химии ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова».

Федоров Владимир Николаевич, кандидат географических наук, профессор, доцент кафедры географии и экологии ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова».

Фёдорова Екатерина Александровна, кандидат педагогических наук, доцент кафедры информатики ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова».

Цыганов Андрей Владимирович, кандидат физико-математических наук, профессор, заведующий научно-исследовательской лабораторией математического моделирования, доцент кафедры высшей математики ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова».

Червон Сергей Викторович, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры физики и технических дисциплин ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова».

Шишкарев Виктор Вячеславович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой кафедры физики и технических дисциплин ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова».

Шубович Валерий Геннадьевич, доктор педагогических наук, кандидат технических наук, заведующий кафедрой информатики, профессор кафедры информатики ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова».

## Editorial team

Editor-in-Chief — Konstantin Konstantinovich Altunin, PhD, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Physics and Technical Disciplines of Ulyanovsk State Pedagogical University.

Elena Aleksandrovna Artemyeva, Doctor of Biological Sciences, Professor of the Department of Geography and Ecology of Ulyanovsk State Pedagogical University.

Maksim Viktorovich Demin, PhD, Candidate of Sciences in Physics and Mathematics, Director of the Research Department, Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

Rinat Galimovich Idrisov, PhD, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Mathematical Modeling of the Sterlitamak branch of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Bashkir State University”.

Vasily Vyacheslavovich Kapitanchuk, PhD, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Informatics of the Ulyanovsk Institute of Civil Aviation named after the Chief Marshal of Aviation B. P. Bugaev.

Nurlan Amirovich Medetov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Dean of the Faculty of Information Technologies, Kostanay State University named after A. Baitursynov, Kostanay, Republic of Kazakhstan.

Nataliya Yurievna Pestova, PhD, Candidate of Chemistry Science, Associate Professor of the Department of Biology and Chemistry of the Ulyanovsk State Pedagogical University.

Svetlana Aleksandrovna Pyrova, PhD, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Biology and Chemistry of Ulyanovsk State Pedagogical University.

Vladimir Nikolaevich Fedorov, PhD, Candidate of Geographical Sciences, Professor, Associate Professor of the Department of Geography and Ecology of Ulyanovsk State Pedagogical University.

Ekaterina Aleksandrovna Fedorova, PhD, Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor of the Department of Informatics of Ulyanovsk State Pedagogical University.

Andrey Vladimirovich Tsyganov, PhD, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of the Research Laboratory of Mathematical Modeling, Associate Professor of the Department of Higher Mathematics of Ulyanovsk State Pedagogical University.

Sergey Viktorovich Chervon, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Professor of the Department of Physics and Technical Disciplines of Ulyanovsk State Pedagogical University.

Viktor Vyacheslavovich Shishkarev, PhD, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Physics and Technical Disciplines of Ulyanovsk State Pedagogical University.

Valeriy Gennadievich Shubovich, Doctor of Pedagogical Sciences, Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Informatics, Professor of the Department of Informatics of Ulyanovsk State Pedagogical University.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Педагогические науки</b>	<b>1</b>
Теория образования и преподавания физики	1
1 Исследование особенностей использования дистанционных технологий в процессе преподавания педагогического проектирования в магистратуре по приоритетным направлениям науки в физическом образовании <i>Е. А. Гришанина</i>	
21 Педагогическое проектирование системы олимпиадных задач по электродинамике в школе <i>Т. В. Галоватюк</i>	
<b>Физико-математические науки</b>	<b>47</b>
Оптика	47
47 Исследование оптических свойств композитного метаматериала с матрицей из материала с отрицательным показателем преломления <i>К. К. Алтунин, И. А. Шарнина</i>	
75 Исследование оптических характеристик ультратонких нанокompозитных плёнок с помощью численных вычислений на языке Python <i>К. К. Алтунин, Е. А. Купрянова</i>	
101 Исследование оптических свойств графеновых наносистем с помощью численных вычислений на языке Python <i>К. К. Алтунин, Ю. А. Кучерова</i>	
Современные информационные технологии в физике	137
137 Разработка системы проверки знаний в дистанционном курсе по оптике нанокompозитных материалов в системе управления обучением MOODLE <i>Е. О. Сорокина</i>	
155 Разработка элементов дистанционного курса по физическим основам квантовой криптографии <i>Я. С. Заммелова</i>	
<b>Авторский указатель</b>	<b>185</b>

# CONTENTS

<b>Pedagogical sciences</b>	<b>1</b>
Theory of education and teaching physics	1
1 Investigation of the features of the use of distance technologies in the process of teaching pedagogical design in the master's program in priority areas of science in physical education <i>E. A. Grishanina</i>	
21 Pedagogical design of the system of Olympiad problems in electrodynamics at school <i>T. V. Galovatyuk</i>	
<b>Physics and mathematics</b>	<b>47</b>
Optics	47
47 Investigation of the optical properties of a composite metamaterial with a matrix made of a material with a negative refractive index <i>K. K. Altunin, I. A. Sharnina</i>	
75 Investigation of optical characteristics of ultrathin nanocomposite films using Python numerical computations <i>K. K. Altunin, E. A. Kupreyanova</i>	
101 Investigation of the optical properties of graphene nanosystems using the Python numerical computations <i>K. K. Altunin, Yu. A. Kucherova</i>	
Modern information technologies in physics	137
137 Development of a system for testing knowledge in a distance course on the optics of nanocomposite materials in the learning management system MOODLE <i>E. O. Sorokina</i>	
155 Development of elements of a distance course on the physical foundations of quantum cryptography <i>Ya. S. Zamlelova</i>	
<b>Author's index</b>	<b>185</b>

## Секция 1

---

### Педагогические науки

---

УДК 530.1  
ББК 22.31  
ГРНТИ 29.31.21  
ВАК 13.00.02

#### **Исследование особенностей использования дистанционных технологий в процессе преподавания педагогического проектирования в магистратуре по приоритетным направлениям науки в физическом образовании**

Е. А. Гришанина  <sup>1</sup>

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», 432071, Ульяновск, Россия*

Поступила в редакцию 25 марта 2021 года  
После переработки 14 апреля 2021 года  
Опубликована 12 июня 2021 года

---

**Аннотация.** Представлены результаты исследования особенностей использования дистанционных технологий в процессе преподавания педагогического проектирования в очной магистратуре по приоритетным направлениям науки в физическом образовании в педагогическом университете. В работе рассматривается технология создания дистанционного курса по педагогическому проектированию в системе Intranet Academic. Электронный образовательный ресурс в системе Intranet Academic имеет формат сайта, что даёт возможность обеспечить непрерывную информационную поддержку обучения педагогическому проектированию курсов по физике. Электронный образовательный ресурс в системе Intranet Academic позволяет обеспечить возможность хранения текущих и промежуточных образовательных результатов, включая результаты тестирования.

**Ключевые слова:** физика, физическое образование, дистанционные технологии, педагогическое проектирование

PACS: 01.40.-d

---

<sup>1</sup>E-mail: grishanina1998@list.ru

## Введение

В работе рассматривается технология создания информационной поддержки курса «Педагогическое проектирование» в системе Intranet Academic и особенности преподавания педагогического проектирования в рамках очной магистратуры по педагогическому направлению подготовки в педагогическом университете. Один из блоков дисциплин предметной подготовки магистратуры педагогического направления подготовки по магистерской программе «Приоритетные направления подготовки в физическом образовании» включает в себя учебную дисциплину «Педагогическое проектирование».

Целью исследования являются разработка, научное обоснование и совершенствование методики преподавания педагогического проектирования курсов по физике в рамках очной магистратуры по педагогическому направлению подготовки магистерской программы «Приоритетные направления подготовки в физическом образовании» в педагогическом университете.

В связи с поставленной целью была сформулирована задача наблюдения за результатами проведения педагогического эксперимента по апробации методики преподавания педагогического проектирования в рамках очной магистратуры в рамках очной магистратуры по педагогическому направлению подготовки по магистерской программе «Приоритетные направления подготовки в физическом образовании» в педагогическом университете.

Объектом исследования являются процесс преподавания педагогического проектирования курсов по физике в рамках очной магистратуры по педагогическому направлению подготовки по магистерской программе «Приоритетные направления подготовки в физическом образовании» в педагогическом университете.

Предметом исследования является процесс формирования учебных умений использования педагогического проектирования курсов по физике в рамках очной магистратуры по педагогическому направлению подготовки с профилем обучения по физике в педагогическом университете.

Гипотеза исследования заключается в том, что если использовать непрерывную информационную поддержку процесса преподавания педагогического проектирования курсов по физике, ориентированного на формирование у студентов практических навыков и умений использовать различные образовательные технологии обучения физике, то процесс обучения физике будет более результативным при организации систематического контроля знаний с применением информационных технологий обучения физике.

Научная новизна работы заключается в широком использовании различных информационных и интерактивных технологий по взаимодействию студентов между собой, студентов с преподавателем при изучении педагогического проектирования курсов по физике с использованием интерактивных технологий обучения физике в рамках очной магистратуры по педагогическому направлению подготовки физико-математического профиля в педагогическом университете.

В качестве метода исследования применяется наблюдение за результатами проведения педагогического эксперимента по апробации методики преподавания педагогического проектирования курсов по физике в рамках очной магистратуры по педагогическому направлению подготовки по магистерской программе «Приоритетные направления науки в педагогическом университете» в педагогическом университете. Изучаются приёмы и способы взаимодействия в процессе преподавания педагогического проектирования курсов по физике в рамках очной магистратуры по педагогическому направлению подготовки физико-математического профиля в педагогическом университете.

Теоретическая значимость исследования заключается в том, что созданные методические материалы по преподаванию педагогического проектирования курсов по физике могут быть использованы в создании новой методологии обучения преподаванию педа-

гогического проектирования курсов по физике с использованием различных образовательных технологий в рамках очной магистратуры по педагогическому направлению подготовки в педагогическом университете, пополнении научной базы актуальными методическими материалами по преподаванию педагогического проектирования курсов по физике.

Практическая значимость исследования заключается в выявлении характерных особенностей преподавания педагогического проектирования курсов по физике в рамках очной магистратуры по педагогическому направлению подготовки по магистерской программе «Приоритетные направления науки в педагогическом университете» в педагогическом университете.

## Обзор

Проведём краткий обзор создания дистанционных курсов и электронных образовательных ресурсов в области высшего образования по физике. Описание разработки дистанционных курсов по физико-технологической тематике, а также сравнение и анализ особенностей дистанционных курсов, электронных курсов по физико-технологической тематике, производилось ранее в работе [1].

В [2] описана разработка и внедрение электронного курса по нанооптике. Рассматриваемый в этой работе электронный курс по нанооптике имеет структуру сайта.

В [3] описана разработка электронного образовательного ресурса в университете при помощи инструментов Google Site и MOODLE, а также проведено сравнение возможностей платформ Google Site и MOODLE для создания электронных образовательных ресурсов по физике.

В [4] проведено исследование информационных образовательных сред и электронных образовательных ресурсов по физике на примере темы «Фотоэффект», созданных с использованием инструментов Google Sites.

Проведенный обзор исследования электронных образовательных ресурсов и дистанционных курсов показывает актуальность создания курсов по физико-технологической тематике с использованием различных методов дистанционной поддержки изучения курсов.

## Результаты разработки информационной поддержки курса по учебной дисциплине «Педагогическое проектирование»

Основной подход к изучению учебной дисциплины «Педагогическое проектирование» с использованием информационных технологий заключается в увеличении визуально воспринимаемой студентом информации посредством использования элементов дистанционного курса в процессе изучения учебной дисциплины «Педагогическое проектирование» в педагогическом университете.

С учётом существующих тенденций перспективным в области фундаментального образования является организация учебного процесса с использованием такой информационной образовательной среды, как система Intranet Academic. Информационная образовательная среда, созданная при помощи инструментария системы Intranet Academic, позволяет доставлять и репрезентировать материалы по учебным дисциплинам, содержащий и разнообразные контрольно-измерительные материалы по физике, а также хранить результаты обучения. Применение формата Intranet Academic на проблемно-ориентированной основе обеспечивает прозрачность результатов, включая тестирование в формате активного, операционального, рефлексивного обучения.

Под проектированием электронного образовательного ресурса по учебной дисциплине «Педагогическое проектирование» понимают процесс разработки электронного

образовательного ресурса, в котором активно используются автоматизированные методы контроля в ходе продвижения при изучении курса по учебной дисциплине «Педагогическое проектирование». Структура электронного образовательного ресурса по учебной дисциплине «Педагогическое проектирование» включает в себя специальным образом сформированные модули, содержащие тематические связанные материалы и элементы контроля в виде тестов, задач и заданий. На первом этапе создания электронного образовательного ресурса производится определение целей и задач, которые необходимо реализовать в процессе проектирования электронного образовательного ресурса. На втором этапе создания электронного образовательного ресурса производится разработка структуры электронного ресурса в виде сайта в строгом соответствии с выбранной тематикой и объёмом курса по учебной дисциплине «Педагогическое проектирование». На третьем этапе создания электронного образовательного ресурса производится разработка содержания блоков электронного образовательного ресурса по модулям и темам. На четвёртом этапе создания электронного образовательного ресурса производится визуализация полученной структуры в наглядном виде для планомерного контроля наполнения различных модулей и тем курса по учебной дисциплине «Педагогическое проектирование». На пятом этапе создания электронного образовательного ресурса производится поиск программного обеспечения для разработки электронного образовательного ресурса и его создание. Дизайн электронного образовательного ресурса выполнен средствами системы Intranet Academic. На шестом этапе создания электронного образовательного ресурса производится разработка методических рекомендаций для пользователя ресурса. На седьмом этапе создания электронного образовательного ресурса производится наполнение модулей элементами и отладка элементов. На восьмом этапе создания электронного образовательного ресурса производится разработка банка тестовых вопросов и заданий по курсу по учебной дисциплине «Педагогическое проектирование», компоновка тестов по темам и модулям. На девятом этапе создания электронного образовательного ресурса производится апробация электронного образовательного ресурса по учебной дисциплине «Педагогическое проектирование» в учебном процессе. На десятом этапе создания электронного образовательного ресурса производится корректирование содержания и выявление недостатков электронного образовательного ресурса.

На первом этапе создания банка заданий и вопросов производится определение целей и задач, для которых будет использоваться банка заданий и вопросов. Банк вопросов, предназначенный для стандартного тестового контроля, и банк вопросов, предназначенный для тестового контроля заданий разного уровня и тематического содержания, будут существенно различаться. На втором этапе создания банка заданий и вопросов производится разработка тематической структуры банка заданий и вопросов в соответствии с выбранными целями и задачами. На третьем этапе создания банка заданий и вопросов производится разработка содержания тестовых заданий и вопросов в составе банка вопросов и заданий по учебной дисциплине «Педагогическое проектирование». На четвёртом этапе создания банка заданий и вопросов производится наполнение банка вопросов и заданий различными типами вопросов и заданий. На пятом этапе создания банка заданий и вопросов производится создание тестов в составе моделей и тем курса по учебной дисциплине «Педагогическое проектирование». На шестом этапе создания банка заданий и вопросов производится отладка тестов в составе дистанционного курса по учебной дисциплине «Педагогическое проектирование». На седьмом этапе создания банка заданий и вопросов производится разработка методических рекомендаций по использованию тестов в составе моделей и тем курса по учебной дисциплине «Педагогическое проектирование». На восьмом этапе создания банка заданий и вопросов производится апробация банка тестовых вопросов и заданий в учебном процессе. На девятом

этапе создания банка заданий и вопросов производится корректирование содержания и выявление недостатков банка тестовых вопросов и заданий в составе дистанционного курса по учебной дисциплине «Педагогическое проектирование».

Первоначально для информационной поддержки изучения учебной дисциплины «Педагогическое проектирование» был создан сайт во внутренней сети университета в системе Microsoft SharePoint на платформе Intranet Academic.

Рис. 1. Страница первичных настроек при создании сайта по педагогическому проектированию в системе Microsoft SharePoint на платформе Intranet Academic.

На рис. 1 изображена страница первичных настроек при создании сайта по педагогическому проектированию в системе Microsoft SharePoint на платформе Intranet Academic. На странице первичных настроек необходимо задать название сайта, опи-

сание, адрес веб-сайта. Затем на странице первичных настроек осуществляется выбор шаблона сайта и разрешения пользователей сайта.

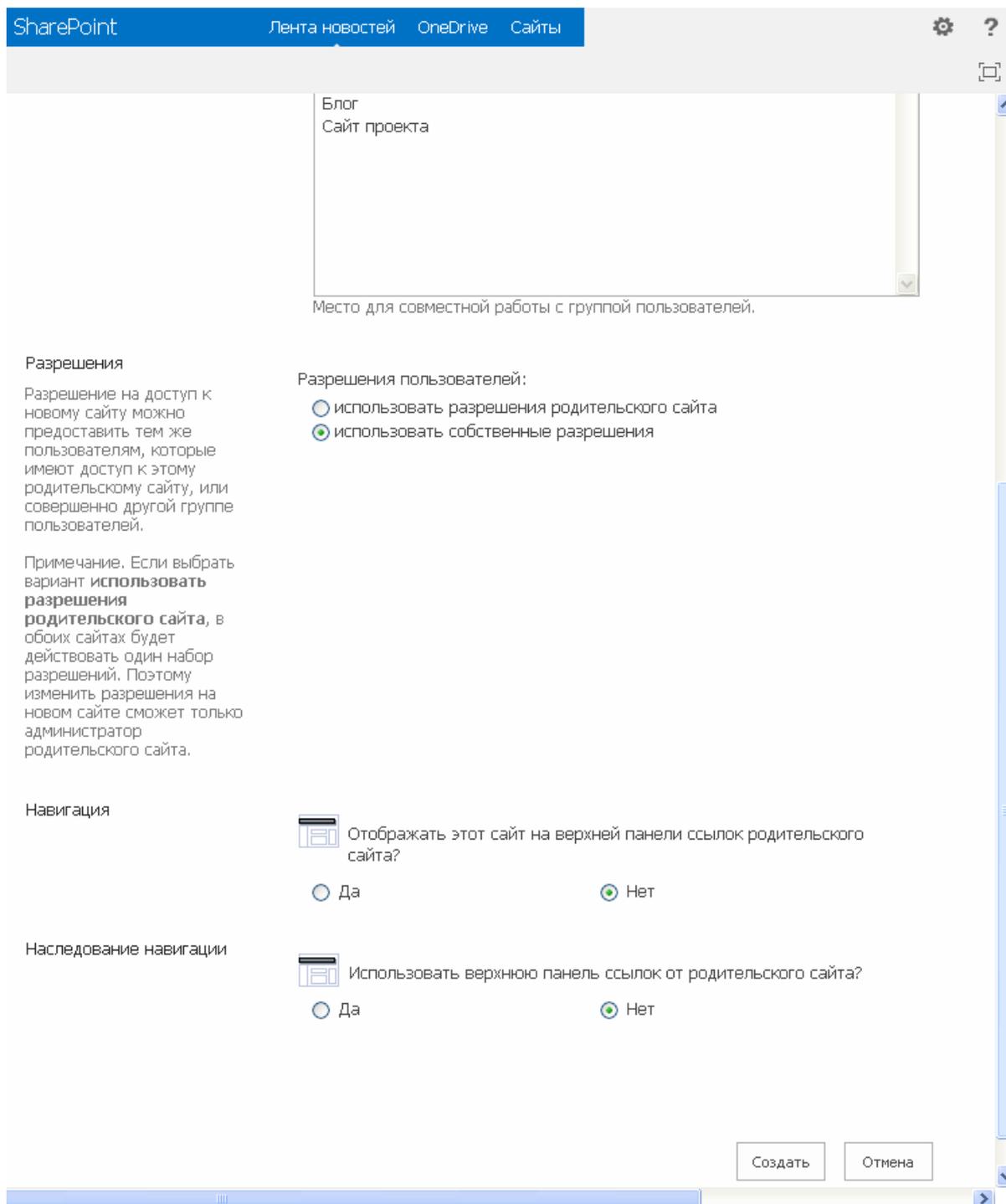


Рис. 2. Часть страницы настроек при создании сайта по педагогическому проектированию в системе Microsoft SharePoint на платформе Intranet Academic.

На рис. 2 изображена страница часть страницы настроек при создании сайта по педагогическому проектированию в системе Microsoft SharePoint на платформе Intranet Academic. Здесь регулируются разрешения сайта и отображение панелей настроек сайта.

На рис. 3 изображена страница настройки пользователей и групп при создании сайта по педагогическому проектированию в системе Microsoft SharePoint на платформе Intranet Academic.

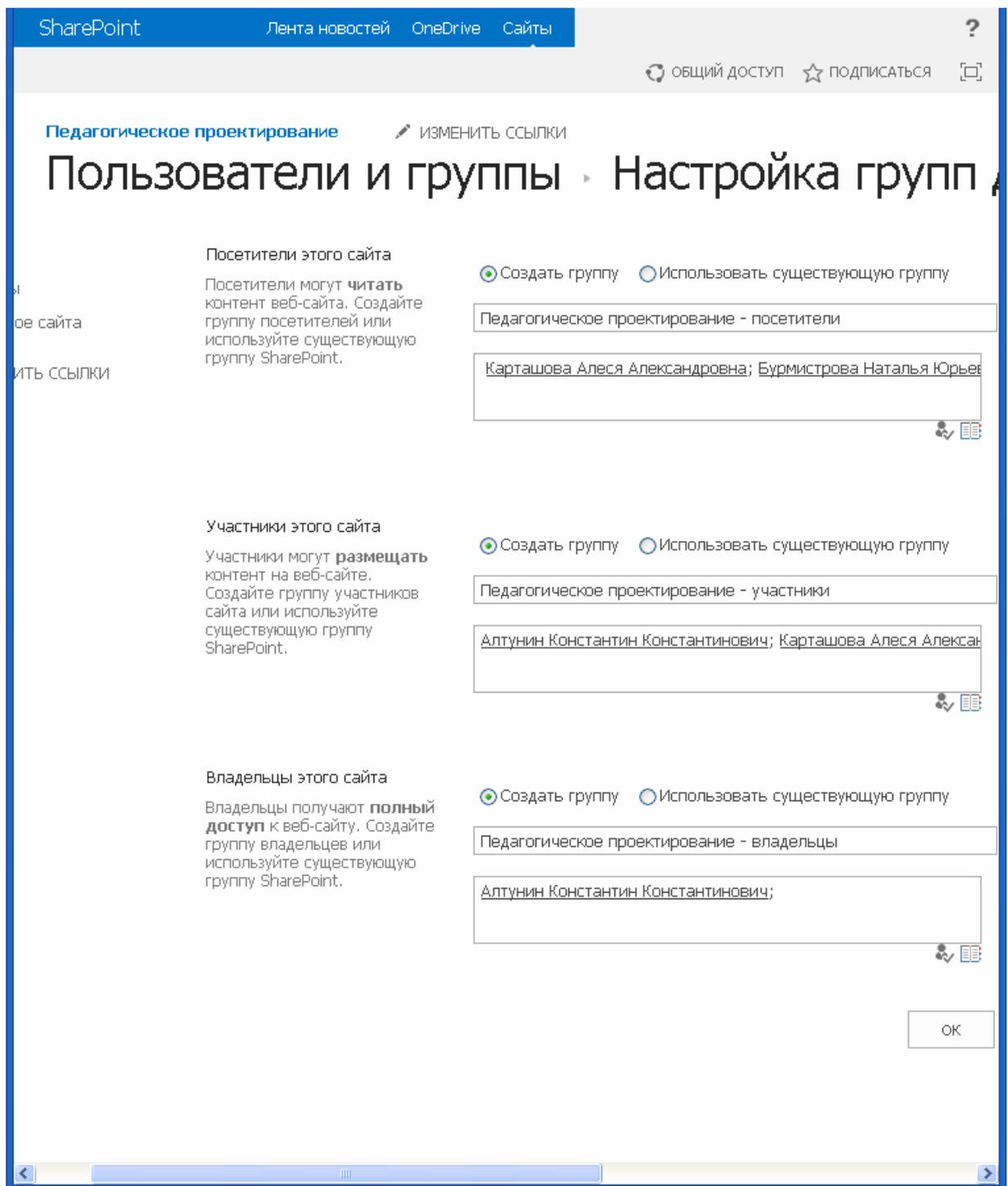


Рис. 3. Страница настройки пользователей и групп при создании сайта по педагогическому проектированию в системе Microsoft SharePoint на платформе Intranet Academic.

На рис. 4 изображена главная страница сайта по педагогическому проектированию в системе Microsoft SharePoint на платформе Intranet Academic, содержащая основные элементы и меню для перехода на другие страницы сайта.

На рис. 5 изображена страница перечня учебных материалов со ссылкой на образовательный сайт по педагогическому проектированию в системе Microsoft SharePoint на платформе Intranet Academic.

На рис. 6 изображена страница с описанием ссылки на образовательный сайт по педагогическому проектированию в системе Microsoft SharePoint на платформе Intranet

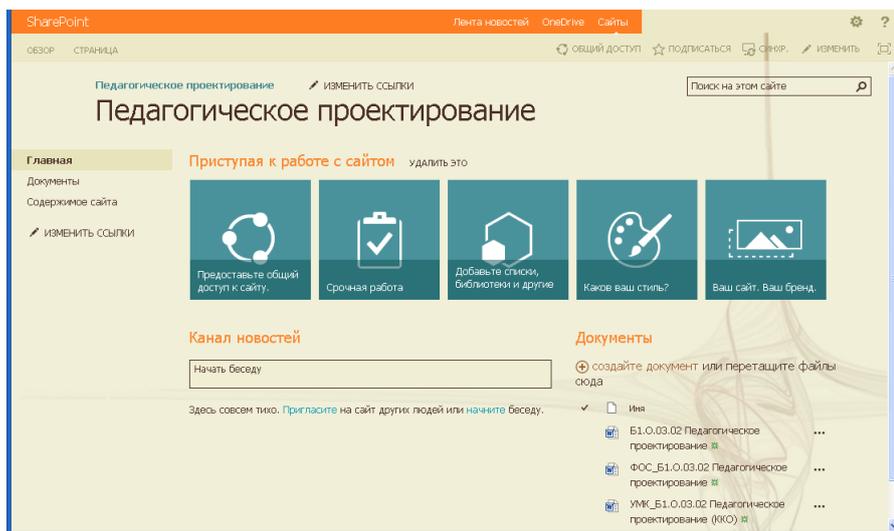


Рис. 4. Главная страница сайта по педагогическому проектированию в системе Microsoft SharePoint на платформе Intranet Academic.

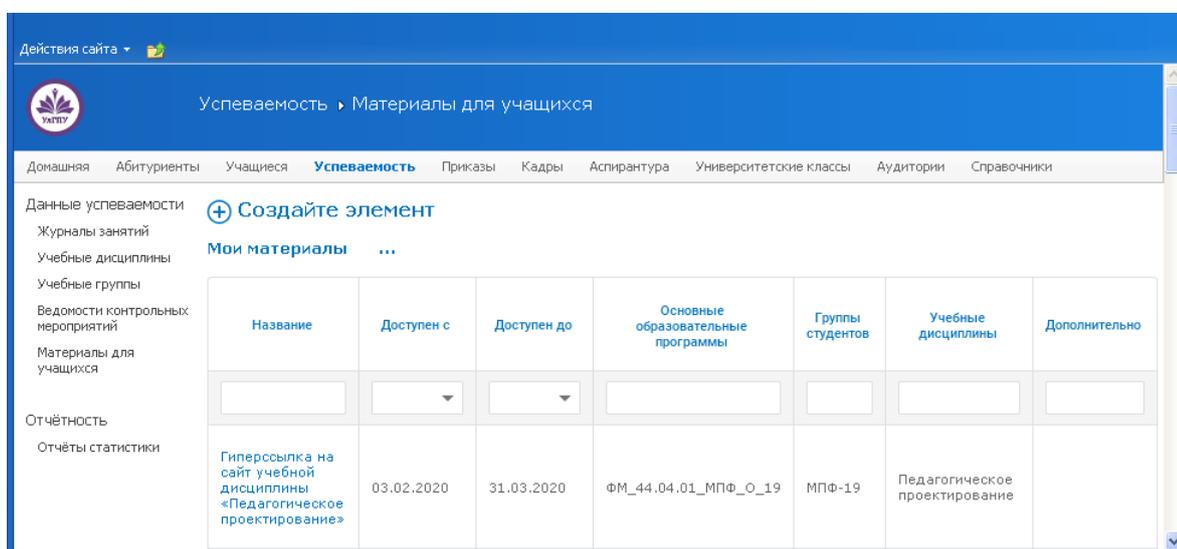


Рис. 5. Страница перечня учебных материалов со ссылкой на образовательный сайт по педагогическому проектированию в системе Microsoft SharePoint на платформе Intranet Academic.

Academic. На странице этого материала можно задать срок действия этого материала.

На рис. 7 изображена страница настроек доступа к материалу со ссылкой на образовательный сайт по педагогическому проектированию в системе Microsoft SharePoint на платформе Intranet Academic.

На рис. 8 изображена страница добавления и настройки карточки учебного материала по образовательному сайту по педагогическому проектированию в системе Microsoft SharePoint на платформе Intranet Academic.

На рис. 9 изображена страница с результатом прикрепления рабочей программы курса по педагогическому проектированию к карточке учебного материала по образовательному сайту по педагогическому проектированию в системе Microsoft SharePoint на платформе Intranet Academic.

На рис. 10 изображена страница элементов с карточками учебных материалов с рабочей программой курса, ссылкой на сайт и методическими материалами по курсу педагогического проектирования в системе Microsoft SharePoint на платформе Intranet

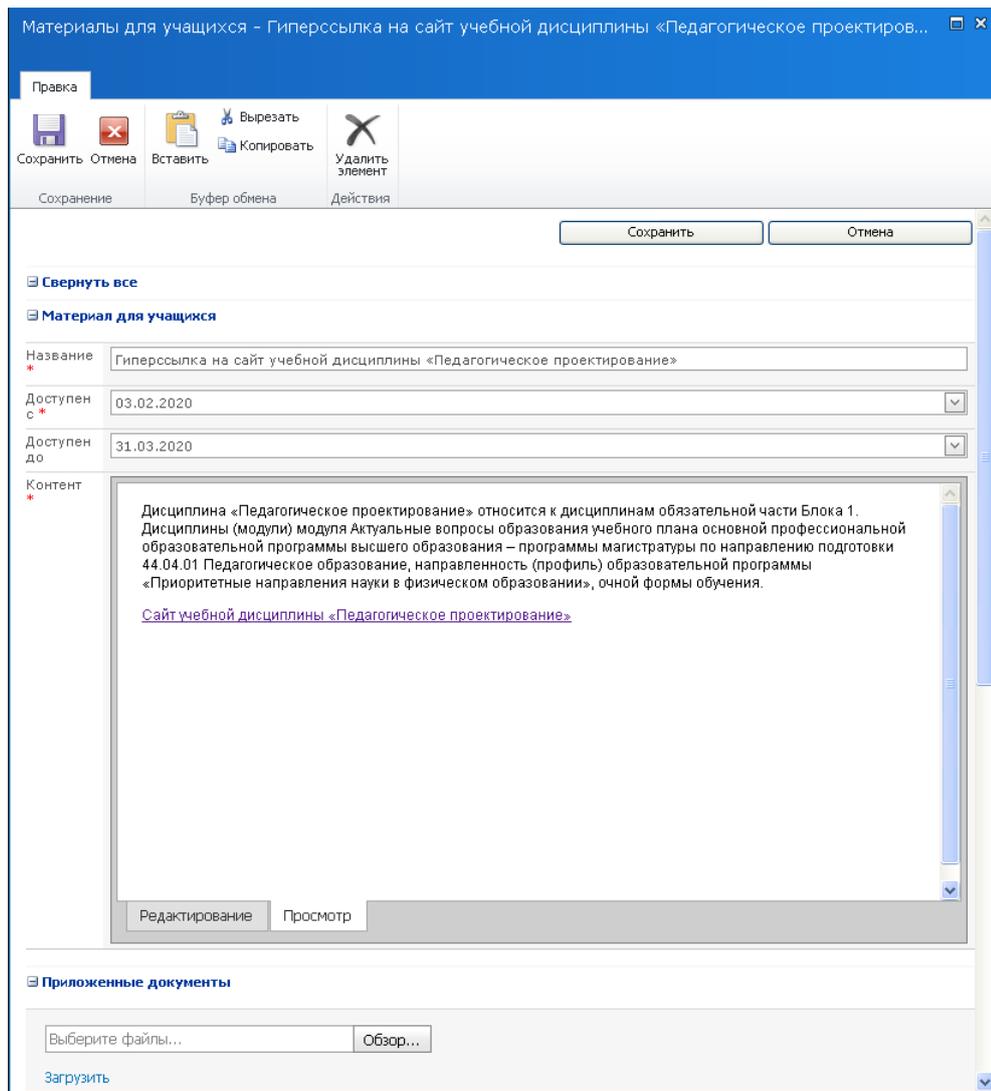


Рис. 6. Страница с описанием ссылки на образовательный сайт по педагогическому проектированию в системе Microsoft SharePoint на платформе Intranet Academic.

Academic.

На рис. 11 изображена страница настройки доступа к элементу на образовательном сайте по педагогическому проектированию в системе Microsoft SharePoint на платформе Intranet Academic.

На рис. 12 изображена страница со списком приложения образовательного сайта по педагогическому проектированию в системе Microsoft SharePoint на платформе Intranet Academic.

На рис. 13 изображена страница с перечнем страниц по разным темам курса по педагогическому проектированию в системе Microsoft SharePoint на платформе Intranet Academic.

На рис. 14 изображена страница создания события календаря на образовательном сайте по педагогическому проектированию в системе Microsoft SharePoint на платформе Intranet Academic.

На рис. 15 изображена страница перечня приложений образовательного сайта по педагогическому проектированию в системе Microsoft SharePoint на платформе Intranet Academic.

На рис. 16 изображена страница со второй частью перечня приложений образовательного сайта по педагогическому проектированию в системе Microsoft SharePoint на

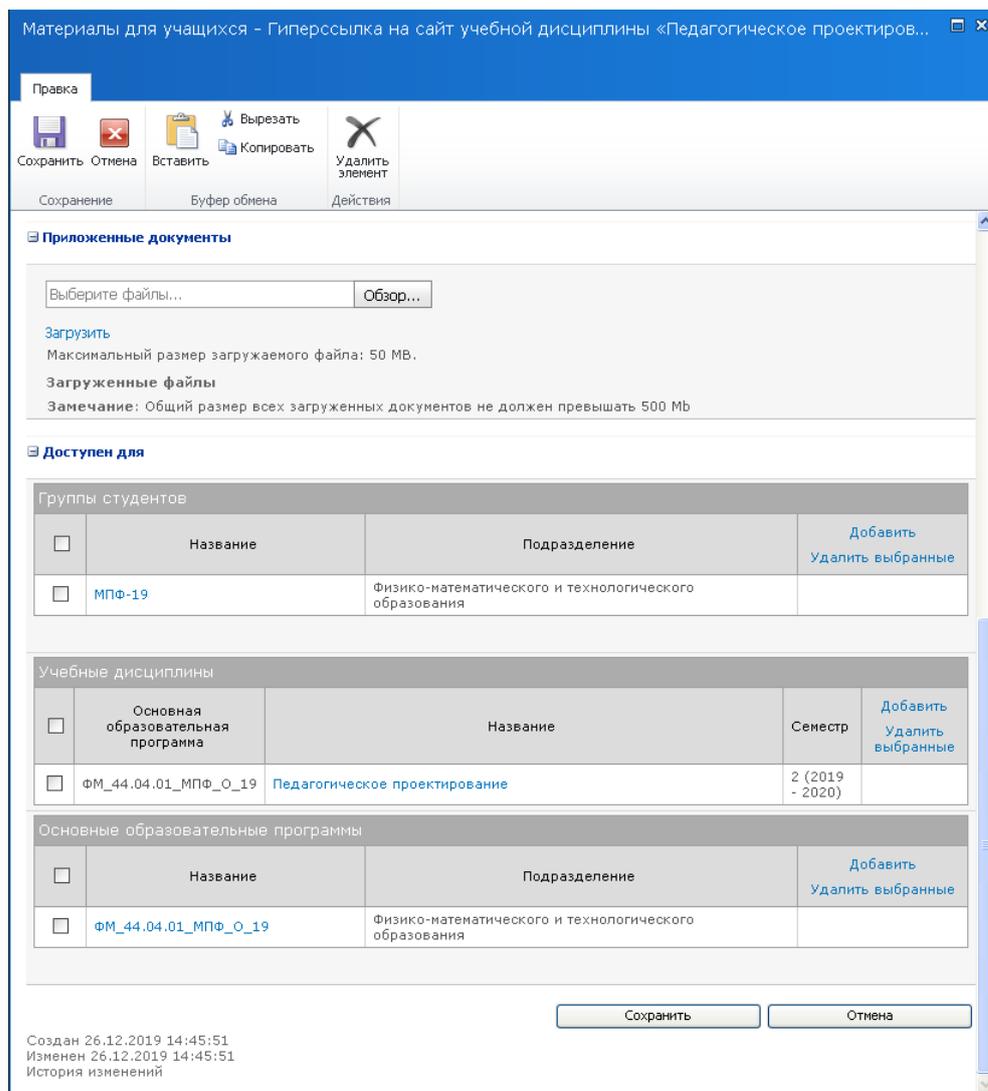


Рис. 7. Страница настроек доступа к материалу со ссылкой на образовательный сайт по педагогическому проектированию в системе Microsoft SharePoint на платформе Intranet Academic.

платформе Intranet Academic.

В качестве первого задания по учебной дисциплине «Педагогическое проектирование» предлагалось создать и заполнить форму проектирования курса по физике. Первое задание оценивалось в 1 балл. В качестве второго задания по учебной дисциплине «Педагогическое проектирование» предлагалось провести аннотирование для создания гиперссылок курса по физике. Второе задание оценивалось в 1 балл. В качестве третьего задания по учебной дисциплине «Педагогическое проектирование» предлагалось спроектировать элемент курса тестового типа из нескольких вопросов по физике на пять минут. Выполнение третьего задания оценивалось в 14 баллов. В качестве четвертого задания по учебной дисциплине «Педагогическое проектирование» предлагалось спроектировать элемент курса лекционного типа по физике, содержащий не менее 1 страницы и 1 вопроса перехода или выхода. Выполнение четвертого задания оценивалось в 14 баллов. В качестве пятого задания по учебной дисциплине «Педагогическое проектирование» предлагалось спроектировать элемент курса типа пояснения с опорным конспектом по физике. Выполнение пятого задания оценивалось в 14 баллов. В качестве шестого задания по учебной дисциплине «Педагогическое проектирование» предлагалось спроектировать элемент курса типа страницы с теоретическим матери-

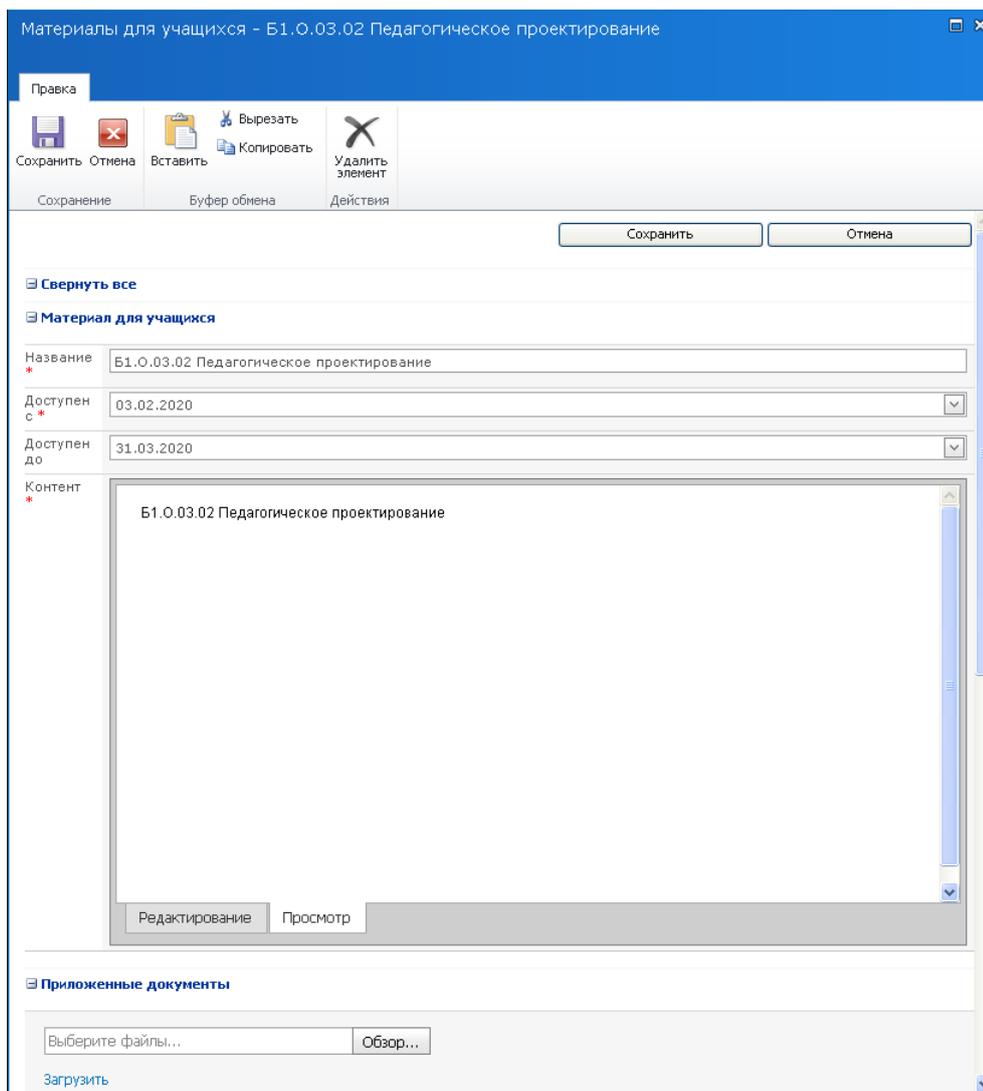


Рис. 8. Страница добавления и настройки карточки учебного материала по образовательному сайту по педагогическому проектированию в системе Microsoft SharePoint на платформе Intranet Academic.

алом по физике. Выполнение шестого задания оценивалось в 14 баллов. В качестве седьмого задания по учебной дисциплине «Педагогическое проектирование» предлагалось спроектировать элемент курса типа файл с презентацией из 12-17 слайдов по физике. Выполнение седьмого задания оценивалось в 14 баллов. В качестве восьмого задания по учебной дисциплине «Педагогическое проектирование» предлагалось спроектировать элемент курса тестового типа по физике на 15 минут, состоящий из не менее пяти вопросов. Выполнение восьмого задания оценивалось в 14 баллов. В качестве девятого задания по учебной дисциплине «Педагогическое проектирование» предлагалось спроектировать элемент курса типа задания со стандартной задачей по физике. Выполнение девятого задания оценивалось в 14 баллов. В качестве десятого задания по учебной дисциплине «Педагогическое проектирование» предлагалось спроектировать элемент курса типа задания с задачей единого государственного экзамена по физике. Выполнение десятого задания оценивалось в 14 баллов. В качестве одиннадцатого задания по учебной дисциплине «Педагогическое проектирование» предлагалось спроектировать элемент курса типа задания с олимпиадной задачей по физике. Выполнение одиннадцатого задания оценивалось в 14 баллов. В качестве двенадцатого задания по учебной дисциплине «Педагогическое проектирование» предлагалось спроектировать

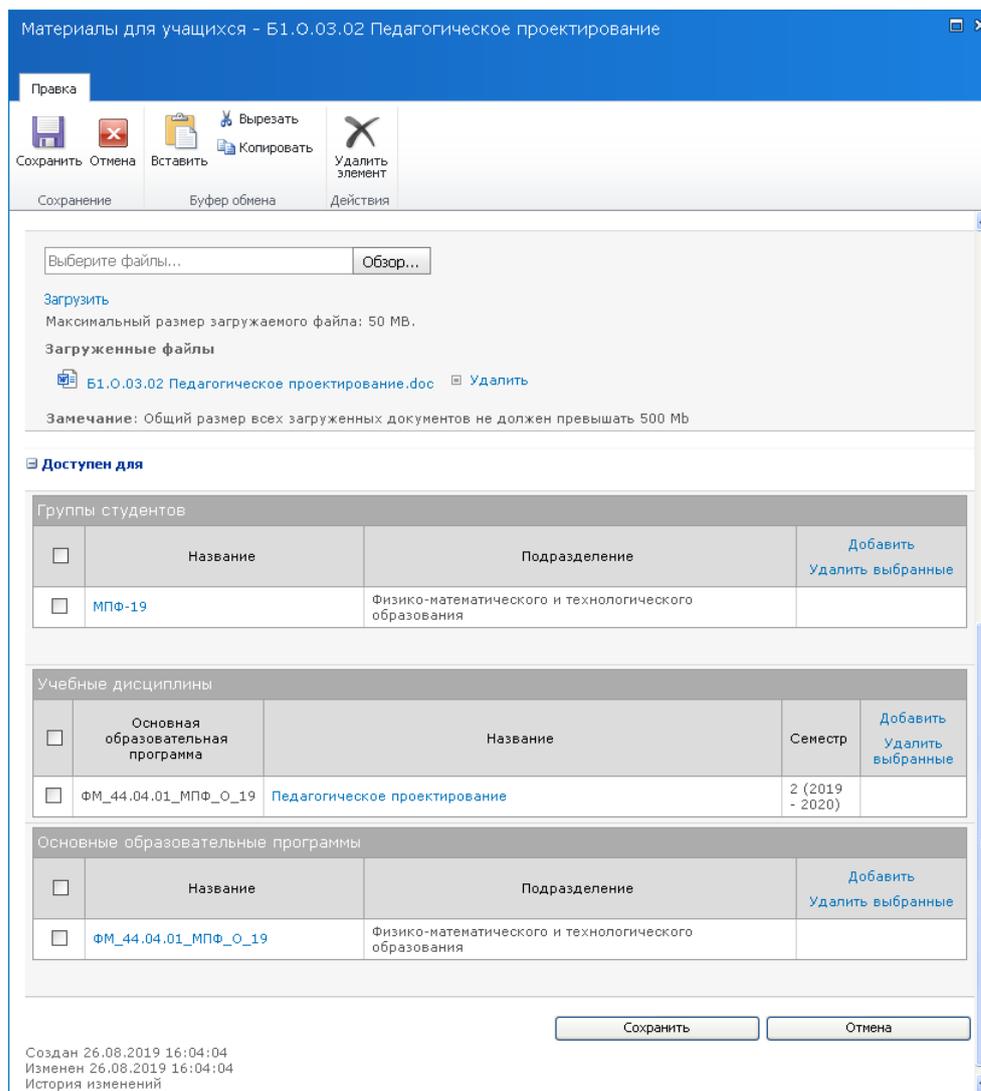


Рис. 9. Страница с результатом прикрепления рабочей программы курса по педагогическому проектированию к карточке учебного материала по образовательному сайту по педагогическому проектированию в системе Microsoft SharePoint на платформе Intranet Academic.

элемент курса типа глоссария по физике. Выполнение двенадцатого задания оценивалось в 14 баллов. В качестве тринадцатого задания по учебной дисциплине «Педагогическое проектирование» предлагалось спроектировать элемент курса семинарского типа по физике. Выполнение тринадцатого задания оценивалось в 14 баллов. В качестве четырнадцатого задания по учебной дисциплине «Педагогическое проектирование» предлагалось спроектировать элемент курса вики-типа по физике. Выполнение четырнадцатого задания оценивалось в 14 баллов. В качестве пятнадцатого задания по учебной дисциплине «Педагогическое проектирование» предлагалось спроектировать элемент курса типа форума по физике. Выполнение пятнадцатого задания оценивалось в 14 баллов. В качестве шестнадцатого задания по учебной дисциплине «Педагогическое проектирование» предлагалось спроектировать элемент курса типа книги по физике, содержащей не менее двух страниц книги с иллюстрацией. Выполнение шестнадцатого задания оценивалось в 14 баллов. В качестве семнадцатого задания по учебной дисциплине «Педагогическое проектирование» предлагалось спроектировать элемент курса типа базы данных по физике. Выполнение семнадцатого задания оценивалось в 14 баллов. В качестве восемнадцатого задания по учебной дисциплине «Педагогическое

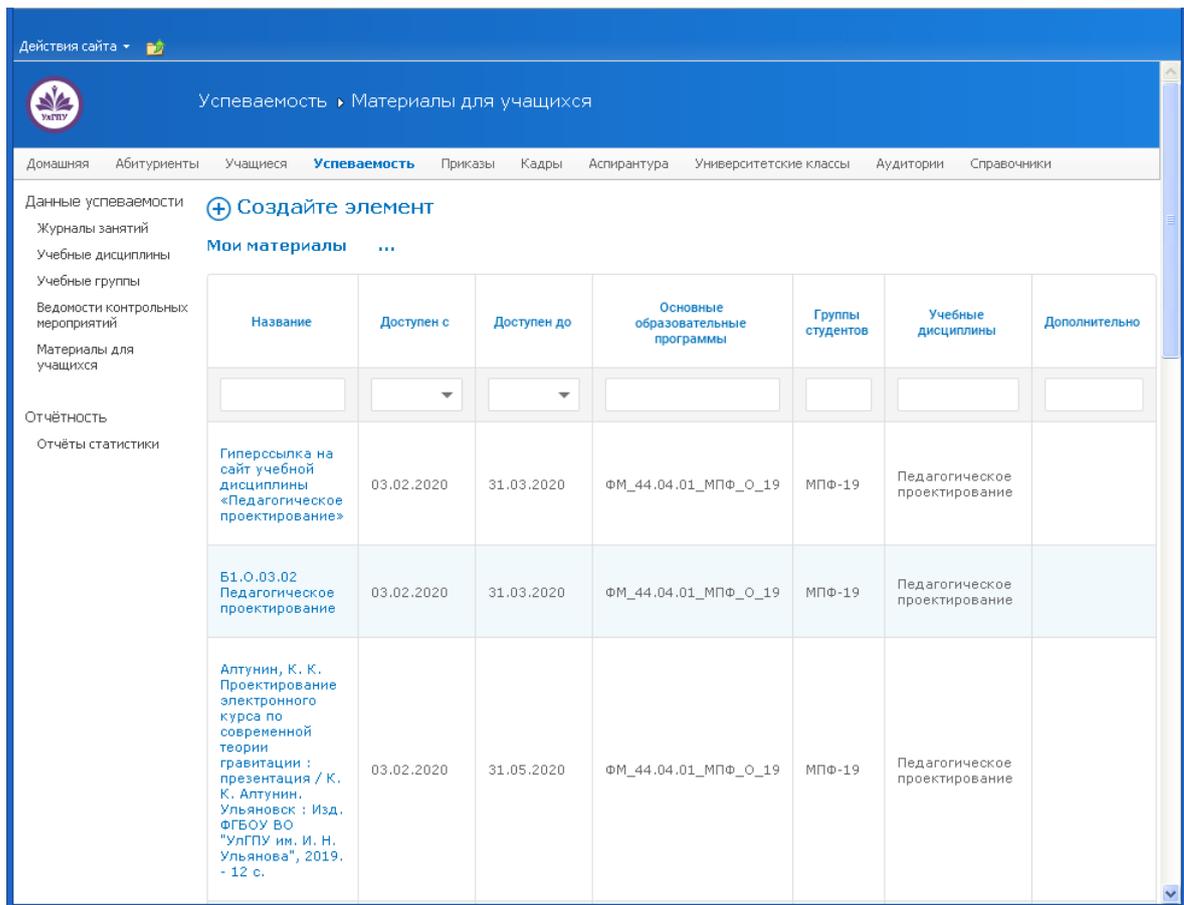


Рис. 10. Страница элементов с карточками учебных материалов с рабочей программой курса, ссылкой на сайт и методическими материалами по курсу педагогического проектирования в системе Microsoft SharePoint на платформе Intranet Academic.

«Педагогическое проектирование» предлагалось спроектировать технологическую карту учебной темы по физике в соответствии с инновационными компонентами деятельности проектирования целостного образовательного процесса. Выполнение восемнадцатого задания оценивалось в 14 баллов. В качестве девятнадцатого задания по учебной дисциплине «Педагогическое проектирование» предлагалось контрольная работа по проектированию индивидуального образовательного маршрута ученика по физике. Выполнение девятнадцатого задания оценивалось в 32 балла. В качестве двадцатого задания по учебной дисциплине «Педагогическое проектирование» предлагалось написать научную статью по проектированию новых технологий обучения физике, ориентированных на использование дистанционного обучения в условиях карантина. Выполнение двадцатого задания оценивалось в 30 баллов. В качестве двадцать первого задания по учебной дисциплине «Педагогическое проектирование» использовался экзамен, который проводился по расписанию экзаменационной сессии. Выполнение восемнадцатого задания оценивалось в 96 баллов.

Итоговой формой контроля по учебной дисциплине «Педагогическое проектирование» является экзамен. Экзамен по учебной дисциплине «Педагогическое проектирование» проходил 9 июля 2020 года в дистанционной форме. Результаты экзамена суммировались с текущими результатами по учебной дисциплине «Педагогическое проектирование». Трудоемкость изучения учебной дисциплины «Педагогическое проектирование» составляет 4 зачётных единицы, поэтому максимальных баллов по учебной дисциплине составляет 400 баллов.

Результаты оценивания результатов изучения учебной дисциплины «Педагогическое

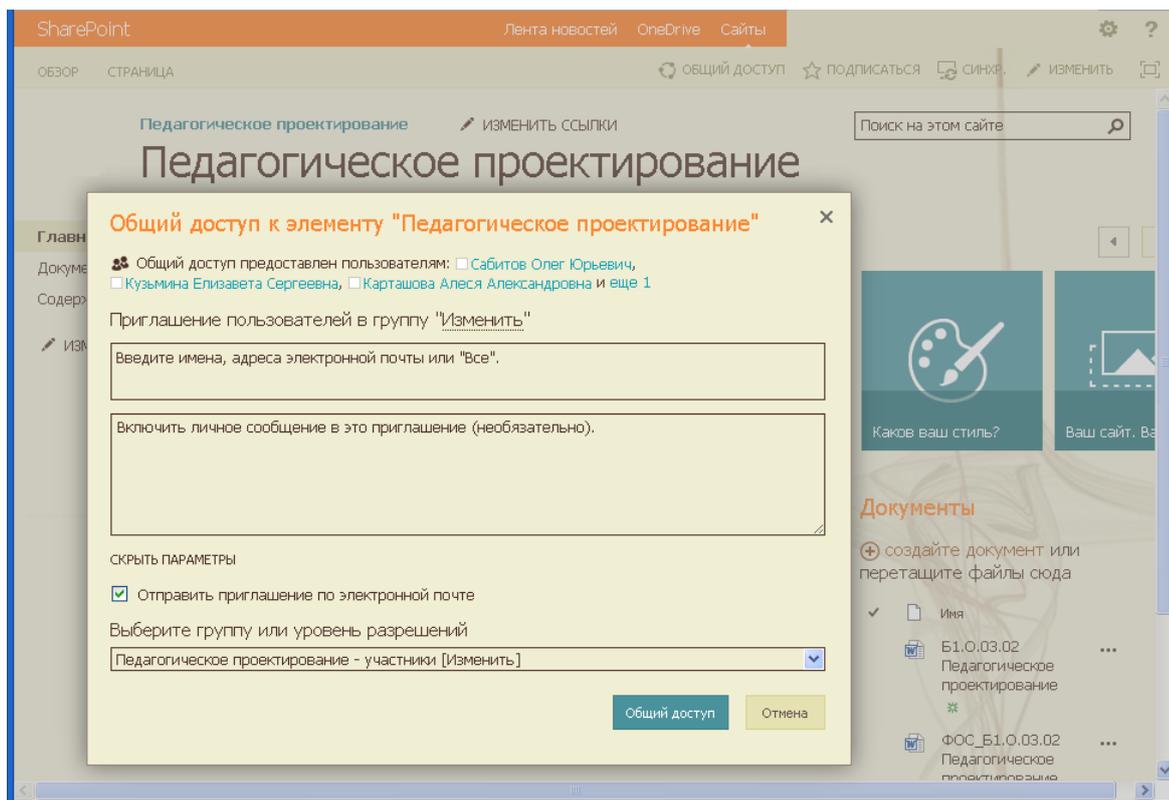


Рис. 11. Страница настройки доступа к элементу на образовательном сайте по педагогическому проектированию в системе Microsoft SharePoint на платформе Intranet Academic.

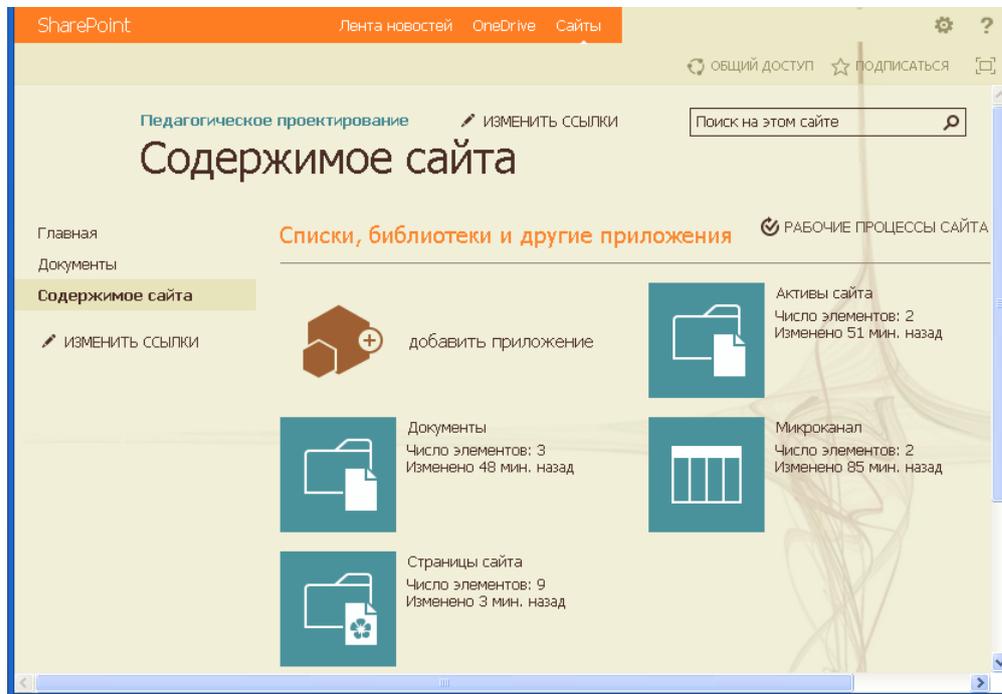


Рис. 12. Страница со списком приложения образовательного сайта по педагогическому проектированию в системе Microsoft SharePoint на платформе Intranet Academic.

проектирование» по рейтинговой системе представлены в таблице 1. Видно, что студенты, посещающие занятия, успешно освоили учебную дисциплину и выполнили задания учебной дисциплины по педагогическому проектированию. Пять студентов выполнили

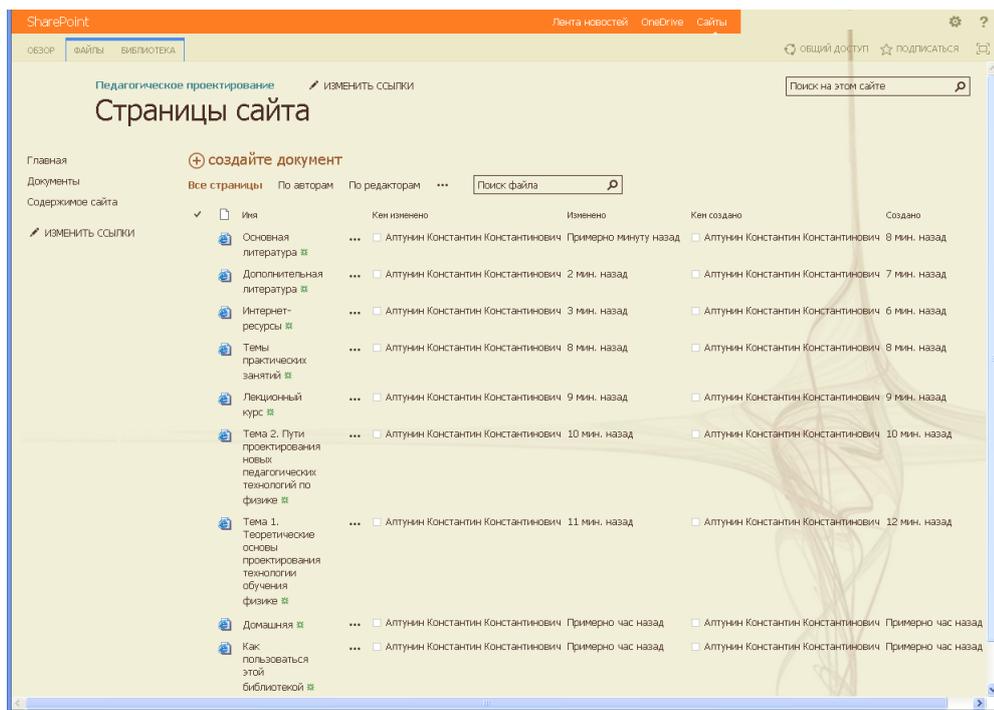


Рис. 13. Страница с перечнем страниц по разным темам курса по педагогическому проектированию в системе Microsoft SharePoint на платформе Intranet Academic.

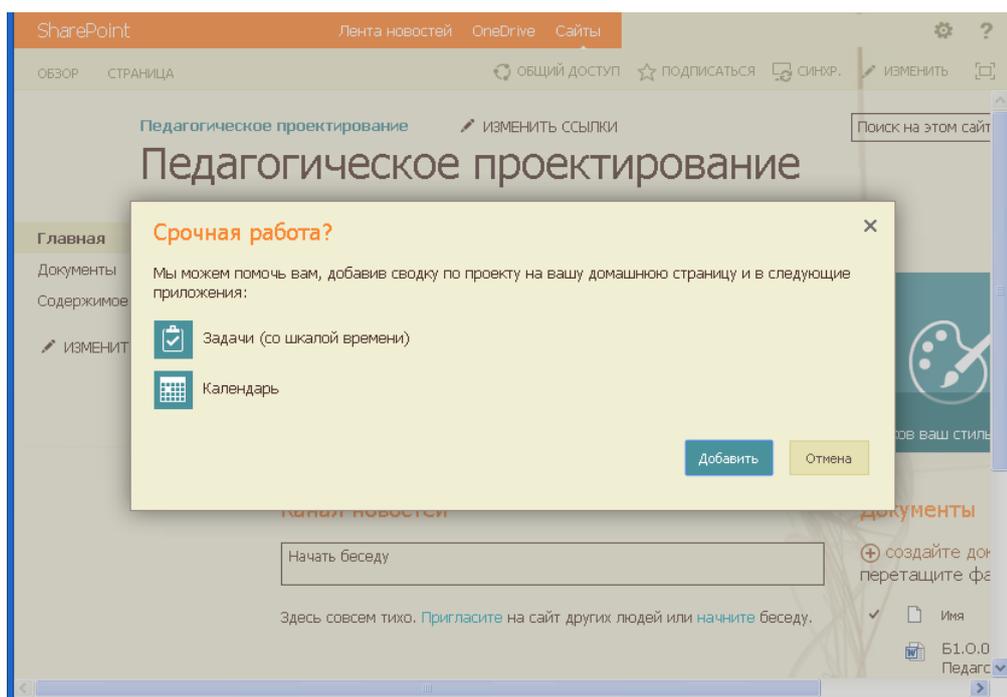


Рис. 14. Страница создания события календаря на образовательном сайте по педагогическому проектированию в системе Microsoft SharePoint на платформе Intranet Academic.

абсолютно все задания на высоком уровне. Ещё два студента группы МПФ-19 выполнили большую часть заданий учебной дисциплины по педагогическому проектированию.

По результатам изучения учебной дисциплины «Педагогическое проектирование» шесть студентов получили оценку «отлично» и один студент получил оценку «хорошо». Наблюдение за ходом апробации учебной дисциплины по педагогического проектиро-

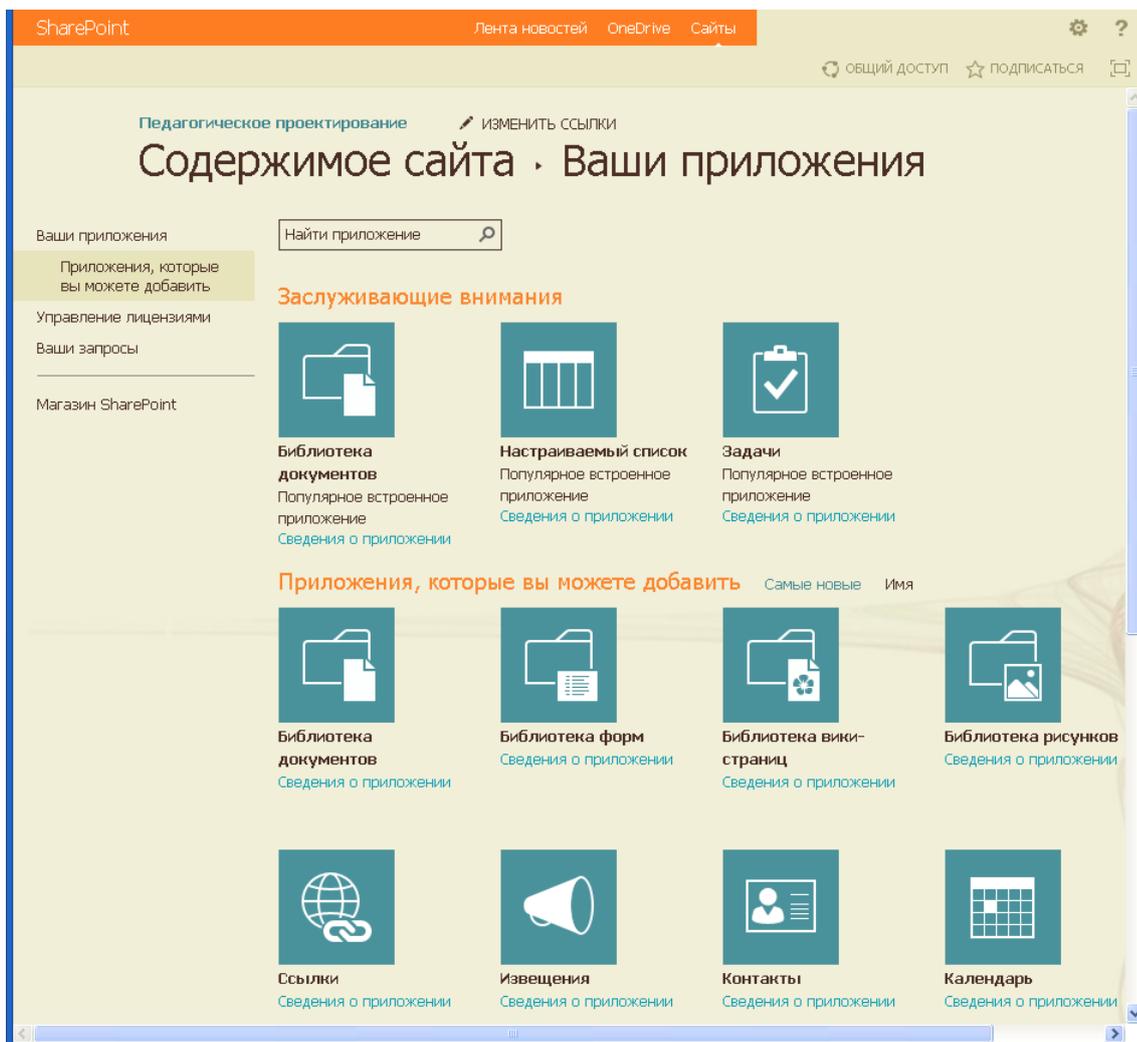


Рис. 15. Страница с первой частью перечня приложений образовательного сайта по педагогическому проектированию в системе Microsoft SharePoint на платформе Intranet Academic.

Таблица 1. Результаты по учебной дисциплине «Педагогическое проектирование».

Студент	Сумма баллов	Оценка
МПФ-19-01	400	5
МПФ-19-02	0	н/я
МПФ-19-03	400	5
МПФ-19-04	400	5
МПФ-19-05	400	5
МПФ-19-06	0	н/я
МПФ-19-07	400	5
МПФ-19-08	0	н/я
МПФ-19-09	362	5
МПФ-19-10	2	н/я
МПФ-19-11	282	4

ванию курсов по физике показало положительные результаты. Поэтому созданная информационная поддержка преподавания учебной дисциплины «Педагогическое проектирование» может быть рекомендована к использованию в очной магистратуре педагогических университетов.

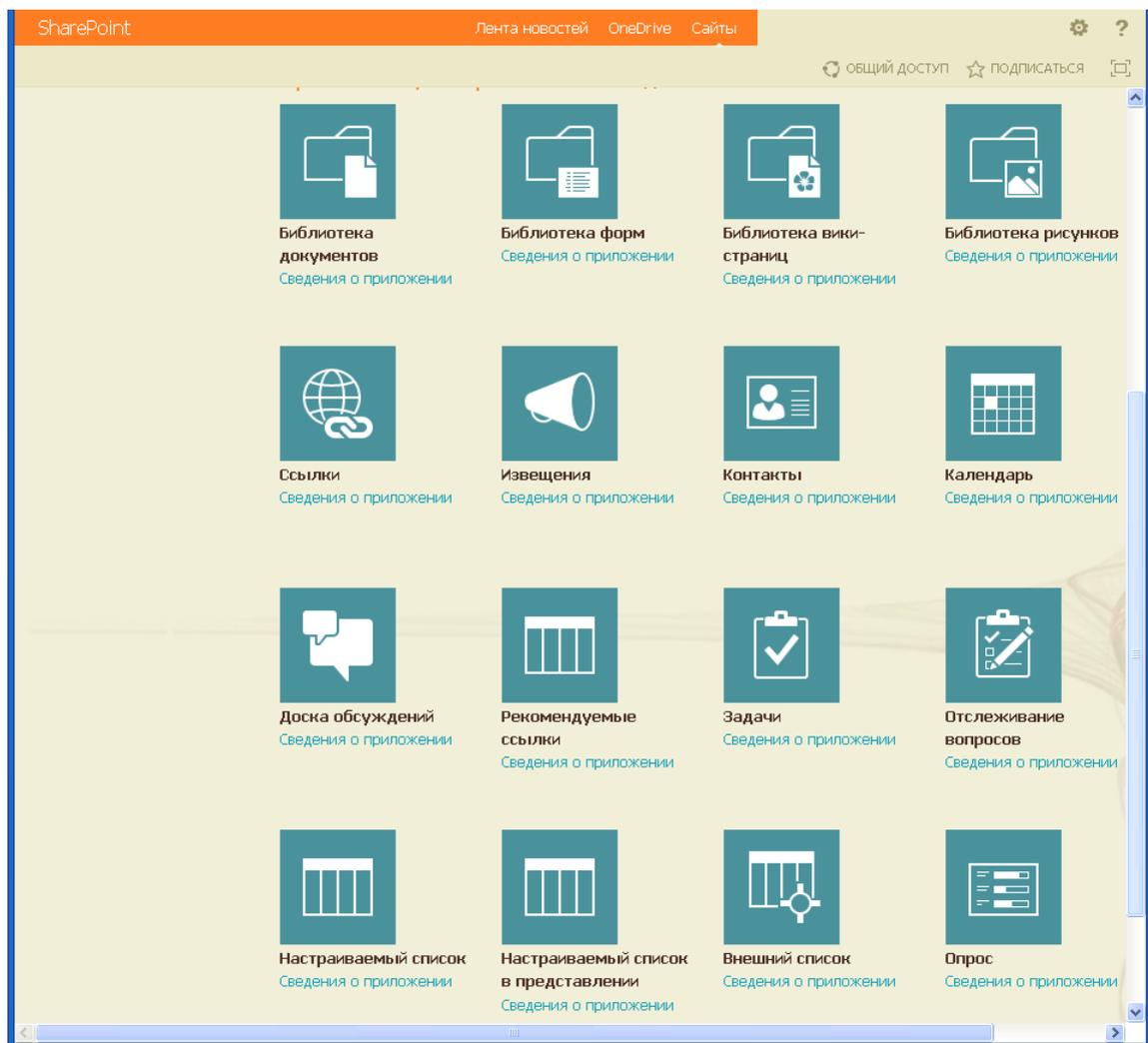


Рис. 16. Страница со второй частью перечня приложений образовательного сайта по педагогическому проектированию в системе Microsoft SharePoint на платформе Intranet Academic.

## Заключение

В работе рассмотрен результат создания информационной поддержки курса «Педагогическое проектирование» в системе Intranet Academic. В настоящей работе проведено всестороннее исследование дистанционного курса по учебной дисциплине «Педагогическое проектирование» в системе Intranet Academic. В работе описан результат разработки сайта по учебной дисциплине «Педагогическое проектирование», который готов к началу использования в учебном процессе в университете, позволяет автоматизировать проверку знаний по педагогическому проектированию курсов в области физико-математического образования. Доказано, что применение формата Intranet Academic на проблемно-ориентированной основе обеспечивает прозрачность результатов, включая тестирование в формате активного, операционального, рефлексивного обучения. Дистанционный курс по учебной дисциплине «Педагогическое проектирование», созданный в системе Intranet Academic, способствует систематизации хранения учебного материала по педагогическому проектированию курсов в области физико-математического образования. При изучении курса «Педагогическое проектирование» система Intranet Academic привносит то, что кроме основного курса по изучаемой дисциплине, используется материал для подготовки в домашних условиях, который позволяет расширить учебное содержание, а также провести дифференциацию учебного материала в соот-

ветствии с индивидуальными потребностями и запросами студентов, изучающих курс. Система Intranet Academic позволяет открывать и закрывать тематические модели в соответствии со временем изучения, что позволяет поддерживать необходимый темп продвижения по курсу «Педагогическое проектирование».

Гипотеза исследования, которая заключается в том, что если использовать непрерывную информационную поддержку процесса преподавания педагогического проектирования курсов по физике, ориентированного на формирование у студентов практических навыков и умений использовать различные образовательные технологии обучения педагогическому проектированию курсов по физике, то процесс обучения физике будет более результативным при организации систематического контроля знаний с применением информационных технологий обучения физике, подтверждена полностью. В качестве подтверждения гипотезы исследования спроектирован сайт в системе Intranet Academic для информационной поддержки курса «Педагогическое проектирование», основанный на комбинации теоретических методов и численных методов в процессе изучения педагогического проектирования курсов в области физико-математического образования, позволяющий повысить познавательный интерес студентов к педагогическому проектированию курсов по традиционной, смешанной и дистанционной формам обучения с применением компьютеров.

Информационная система поддержки курса «Педагогическое проектирование» в виде сайта, созданного в системе Intranet Academic, способна стать эффективным помощником, автоматизирующим наиболее трудоёмкие элементы труда преподавателя в процессе преподавания учебных дисциплин физико-математической направленности. Созданный сайт по курсу «Педагогическое проектирование» позволит планировать, организовывать и проводить изучение теоретического материала курса по педагогическому проектированию курсов в области физико-математического образования в дистанционной или смешанной форме обучения. Разработанный сайт по курсу «Педагогическое проектирование» может занять особое место среди дистанционных курсов по физико-математической тематике, предназначенных для студентов магистратуры физико-математической направленности подготовки в педагогических университетах. В работе разработан оригинальный сайт по курсу «Педагогическое проектирование», который готов к началу использования в учебном процессе. Использование дистанционного курса «Педагогическое проектирование» способствует интенсификации учебного процесса и более осмысленному изучению материала, приобретению навыков самоорганизации и превращению систематических знаний в системные, помогает развитию познавательной деятельности обучаемых и интереса к предмету.

Разработанный сайт для информационной поддержки изучения учебной дисциплины «Педагогическое проектирование» может занять особое место среди электронных образовательных ресурсов, предназначенных для студентов магистратуры по магистерской программе «Приоритетные направления науки в физическом образовании» в педагогических университетах.

#### **Список использованных источников**

1. Разработка и сравнение электронных курсов по физико-технологической тематике / К. К. Алтунин [и др.] // Наука online. — 2018. — № 4 (5). — С. 94–108. — URL: [http://nauka-online.ru/wp-content/uploads/2019/01/AltuninMakushkinaPodpolkovnikovaSerova4\\_2018.pdf](http://nauka-online.ru/wp-content/uploads/2019/01/AltuninMakushkinaPodpolkovnikovaSerova4_2018.pdf).
2. Алтунин К. К. Разработка и внедрение электронного курса по нанооптике // В книге: Актуальные проблемы физической и функциональной электроники материалы 19-й Всероссийской молодежной научной школы-семинара. — 2016. — С. 128–129.

3. Алтунин К. К. Разработка электронного образовательного ресурса в университете при помощи инструментов Google Site и MOODLE // Поволжский педагогический поиск. — 2017. — № 3 (21). — С. 116–124.
4. Алтунин К. К., Коннова Т. С. Исследование информационных образовательных сред и электронных учебников на примере темы “Фотоэффект” // В сборнике: Актуальные вопросы преподавания технических дисциплин Материалы Всероссийской заочной научно-практической конференции. — 2016. — С. 11–16.

**Сведения об авторах:**

**Елена Алексеевна Гришанина** — магистрант факультета физико-математического и технологического образования ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», Ульяновск, Россия.

E-mail: grishanina1998@list.ru

ORCID iD  0000-0003-4857-417X

Web of Science ResearcherID  ABH-1726-2020

# Investigation of the features of the use of distance technologies in the process of teaching pedagogical design in the master's program in priority areas of science in physical education

E. A. Grishanina 

*Ulyanovsk State Pedagogical University, 432071, Ulyanovsk, Russia*

Submitted March 25, 2021

Resubmitted April 14, 2021

Published June 12, 2021

---

**Abstract.** The investigation results of the features of the use of distance technologies in the process of teaching pedagogical design in a full-time master's program in priority areas of science in physical education at a pedagogical university are presented. The paper considers the technology of creating a distance course “Pedagogical design” in the Intranet Academic system. The electronic educational resource in the Intranet Academic system has a web-site format, which makes it possible to provide continuous information support for teaching the pedagogical design of courses in physics. An electronic educational resource in the Intranet Academic system allows you to provide the ability to store current and intermediate educational results, including test results.

**Keywords:** physics, physical education, distance technologies, pedagogical design

PACS: 01.40.-d

---

## References

1. Altunin K. K. Development of an electronic educational resource at the university using Google Site and MOODLE tools // Volga region pedagogical search. — 2017. — no. 3 (21). — P. 116–124.
2. Altunin K. K., Konnova T. S. Study of information educational environments and electronic textbooks on the example of the topic “Photo effect” // In the proceedings: Topical issues of teaching technical disciplines Proceedings of the All-Russian Correspondence Scientific and Practical Conference. — 2016. — P. 11–16.
3. Altunin K. K. Development and implementation of an electronic course on nanooptics // In the proceedings: Actual problems of physical and functional electronics materials of the 19th All-Russian Youth Scientific School-Seminar. — 2016. — P. 128–129.
4. Development and comparison of electronic courses on physical and technological topics / K. K. Altunin [et al.] // Science online. — 2018. — no. 4(5). — P. 94–108. — URL: [http://nauka-online.ru/wp-content/uploads/2019/01/AltuninMakushkinaPodpolkovnikovaSerova4\\_2018.pdf](http://nauka-online.ru/wp-content/uploads/2019/01/AltuninMakushkinaPodpolkovnikovaSerova4_2018.pdf).

## Information about authors:

**Elena Alekseevna Grishanina** — Master's student of the Faculty of Physics, Mathematics and Technological Education of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ulyanovsk State Pedagogical University”, Ulyanovsk, Russia.

E-mail: [grishanina1998@list.ru](mailto:grishanina1998@list.ru)

ORCID iD  0000-0003-4857-417X

Web of Science ResearcherID  ABH-1726-2020

УДК 53.01  
ББК 22.3  
ГРНТИ 29.01.45  
ВАК 13.00.02

## Педагогическое проектирование системы олимпиадных задач по электродинамике в школе

Т. В. Галоватюк  <sup>1</sup>

МБОУ г. Ульяновска «Средняя школы № 85», 432066, Ульяновск, Россия

Поступила в редакцию 28 апреля 2021 года мая 2021 года\*  
Опубликована 12 июня 2021 года

---

**Аннотация.** Рассмотрен процесс педагогического проектирования системы олимпиадных задач по электродинамике в школе. В процессе выполнения работы была внедрена система задач и заданий по электродинамике для подготовки к олимпиадам по физике учащихся одиннадцатых классов общеобразовательной школы. Проведён анализ задач олимпиадного типа по электродинамике. В ходе выполнения работы проведён педагогический эксперимент, который показал эффективность системы подготовки учащихся к олимпиадам по физике. В результате педагогического эксперимента показано, что разработанная система олимпиадных задач по электродинамике позволяет проводить эффективную подготовку к решению задач по физике олимпиадного типа.

**Ключевые слова:** физика, физическое образование, задачи по физике, система подготовки учащихся, система задач по физике, педагогический эксперимент

RACS: 01.40.-d

---

### Введение

В настоящее время существует большое количество олимпиад по физике и физико-математических дисциплин, поэтому становится актуальной создание системы подготовки школьников к олимпиадам по физике различного уровня. Одной из приоритетных задач современного образования по физике в старших классах общеобразовательной школы становится обучение и воспитание наиболее подготовленных учащихся по физике к участию к олимпиадах различных уровней. При этом важным оказывается не только развитие предметной подготовки учащихся по физике, но и выявление этой подготовки, ещё никак не проявившейся у обучающихся.

Цель работы является исследование внедрение системы олимпиадных задач по электродинамике в общеобразовательной школе.

Объектом исследования является система олимпиадных задач по электродинамике в 11 классе общеобразовательной школы.

Предметом исследования является процесс обучения решению задач по электродинамике разного уровня и типа в 11 классе общеобразовательной школы.

Научная новизна работы заключается в совместном использовании традиционных и смешанных форм подготовки к олимпиадам по физике.

---

<sup>1</sup>E-mail: nazarowa.tanja@yandex.ru

В качестве методов исследования применяются методы решения олимпиадных задач по электродинамике в 11 классе общеобразовательной школы.

Гипотеза исследования состоит в том, что если использовать систему олимпиадных задач по электродинамике в систематически организованной подготовке в традиционной форме в сочетании с использованием информационных технологий, то можно создать эффективную систему подготовки к олимпиадам по физике в общеобразовательной школе.

## **Обзор работ по методике решения задач по физике в школе**

Решение задач по физике в процессе изучения физики в общеобразовательной школе играет важнейшую роль в развитии мышления учащихся. Процесс решения задач по физике является неотъемлемой частью всего многопланового процесса изучения курса физики в общеобразовательной школе. С помощью задач по физике учащиеся постигают премудрости физики, применяют положения физических теорий для анализа конкретных ситуаций, учатся логически рассуждать, преодолевая возникающие трудности, избавляются от заблуждений. Преподаватель физики имеет возможность повлиять на ход мыслей учащихся, ненавязчиво, казалось бы, но довольно настойчиво, раз за разом повторяя негромко одни и те же истины, на которые можно опереться не только в простых типовых задачах, но и при решении трудных задач по физике. Результаты разработки системы олимпиадных задач по физике были описаны в работах [1,2].

Общие методические вопросы решения задач по физике рассматривались в работах [3–9]. Креативные методы и эвристические приёмы решения сложных и нестандартных задач по физике рассматривались в работах [10–15]. Методическому аспекту формирования умений решения задач, развитию логического, предметно-специфического мышления учащихся всегда уделялось серьезное внимание в научных педагогических исследованиях (по физике, прежде всего, следует отметить работы А. В. Усовой [16], Н. Н. Тулькибаевой, А. А. Боброва, Б. Ф. Абросимова, В. К. Кобушкина, С. Е. Коменецкой, В. П. Орехова [3, 5], О. Ф. Кабардина, В. А. Орлова, И. Л. Касаткиной, Г. А. Дзида, Ю. А. Саурова и др.). В работе [16] была предложена структура учебной деятельности по решению физических задач. Разветвлённая система из разноуровневых задач по физике приводится в [17]. Например, методические аспекты системы задач по физике рассматривалась в работе [18]. Компьютерная интерактивная система решения задач по физике рассматривалась в работе [19]. Общие вопросы педагогики в методике преподавания были рассмотрены в [20–23].

## **Элементы системы олимпиадных задач по электродинамике**

Система олимпиадных задач по физике направлена на практическую реализацию одной из приоритетных задач современного школьного образования по физике, которая становится ключевым элементом в процессе обучения физике. При этом важным оказывается не только последовательная реализация стандартных методов углубленной подготовки по физике, но и развитие олимпиадной подготовки учащихся по физике, необходимой не только для успешного поступления в ведущие вузы, но и успешного обучения в вузах и становления будущего специалиста в области физики. Значение работы с одарёнными учащимися трудно переоценить в связи с характерными особенностями в социально-экономическом развитии страны в настоящее время, приводящими к острой необходимости подготовки специалистов самого высокого уровня в области физики.

При создании системы задач по физике из задач, связанных между собой и имеющих несколько уровней сложности, проводят всесторонний анализ учебного материала по физике в рамках выбранных разделов и тем, устанавливают соответствие темам,

производят отбор содержания, производят выбор методов и методических приёмов для составления и отбора задач, выполняют техническое создание системы задач по физике в соответствии с предъявляемыми требованиями к уровню олимпиадных заданий.

В самостоятельной части работы разработана система олимпиадных задач по электродинамике для 11 класса. Произведён подбор и анализ олимпиадных задач по электродинамике по программе Всероссийской олимпиады школьников по физике для 11 класса. Выполним анализ олимпиадных задач по электродинамике в одиннадцатом классе общеобразовательной школы.

### Задача 1. Электрические заряды и проводящая сфера

Экспериментатор Глюк поместил точечный заряд  $Q_1$  на расстоянии  $R/3$  от центра тонкостенной незаряженной проводящей сферы  $O$  (рис. 1). Радиус тонкостенной незаряженной проводящей сферы равен  $R$ . Снаружи тонкостенной незаряженной проводящей сферы находится точечный заряд  $Q_2$  на расстоянии  $2R$  от центра сферы. Сфера расположена на расстоянии от Земли значительно большем  $R$  и соединена с Землёй через источник с электродвижущей силой  $\mathcal{E}$  и ключ  $K$ . Потенциал Земли примите равным нулю.

1. Найдите потенциал электрического поля  $\varphi$  в центре сферы при разомкнутом ключе  $K$ .
2. Найдите электрический заряд  $Q$  сферы после замыкания ключа  $K$  и наступления равновесия.

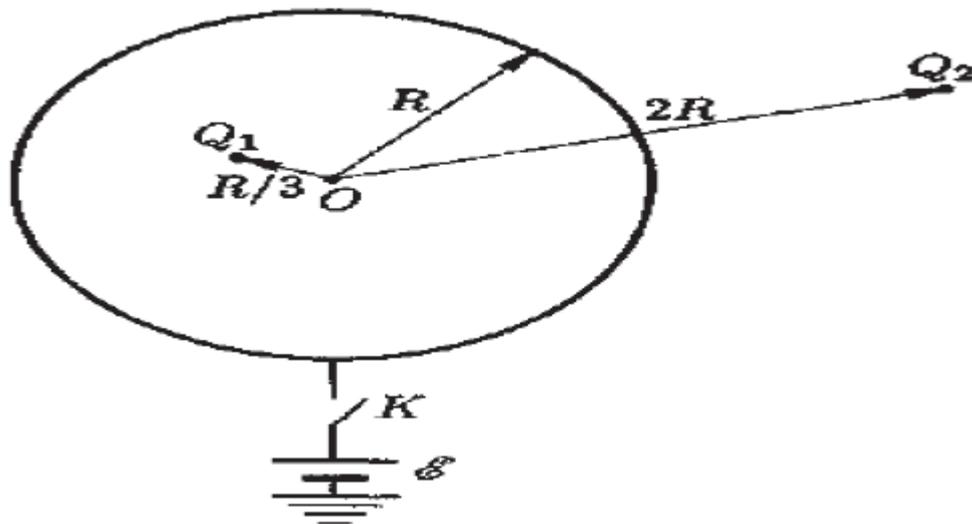


Рис. 1. Тонкостенная незаряженная проводящая сфера.

### Решение.

1. До замыкания ключа заряды на внутренней и внешней поверхностях сферы распределяются неравномерно, но их суммарный заряд равен нулю. Потенциал в центре сферы

$$\varphi = k \frac{Q_1}{R/3} + k \frac{Q_2}{2R} = \frac{k}{R} \left( 3Q_1 + \frac{Q_2}{2} \right). \quad (1)$$

2. После замыкания ключа на внутренней и внешней поверхностях сферы появятся заряды  $q_1$  и  $q_2$ . Причём  $q_1 = -Q_1$ . Найдём  $q_2$ . Потенциал сферы равен  $\mathcal{E}$  и создаётся зарядами  $Q_2$  и  $q_2$ , так как заряды  $Q_1$  и  $q_1$  вне сферы поля не создают. Уберём мысленно заряды  $Q_1$  и  $q_1$ . Распределение заряда  $q_2$  при этом не изменится. В поле, создаваемом зарядами  $Q_2$  и  $q_2$ , потенциал сферы (равный  $\mathcal{E}$ ) равен потенциалу в центре сферы:

$$k \frac{q_2}{R} + k \frac{Q_2}{2R} = \mathcal{E}. \quad (2)$$

Откуда

$$q_2 = \frac{\mathcal{E}R}{k} - \frac{Q_2}{2} = 4\pi\varepsilon_0\mathcal{E}R - \frac{Q_2}{2} . \quad (3)$$

$$Q = q_1 + q_2 = -Q_1 - \frac{Q_2}{2} + 4\pi\varepsilon_0R\mathcal{E} . \quad (4)$$

### Задача 2. Три батарейки

Экспериментатор Глюк собрал электрическую цепь (рис. 2), подключив по ошибке одну из батареек параллельно, а не последовательно двум другим. Найдите силу тока через резисторы в получившейся электрической цепи. Каждый резистор имеет сопротивление  $R$ . Все батарейки одинаковы и имеют электродвижущую силу  $\mathcal{E}$ . Внутренние сопротивления батареек малы по сравнению с величиной сопротивления  $R$ .

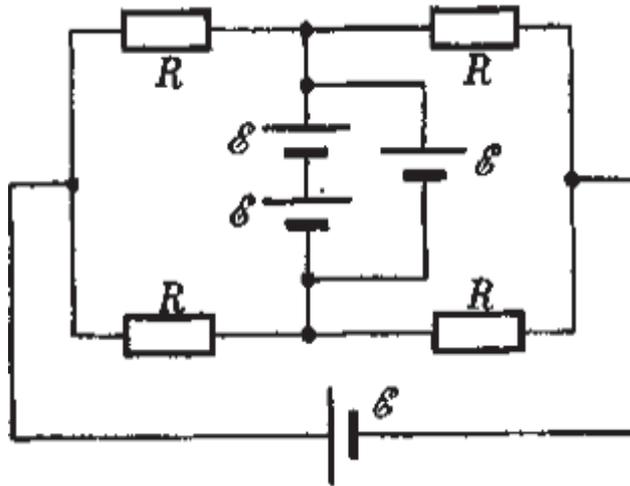


Рис. 2. Электрическая схема с тремя батарейками.

### Решение.

Прежде всего, исследуем подробнее систему одинаковых батареек в центре схемы (рис. 3). Напряжение  $U_{12}$  между точками 1 и 2 можно рассчитать по двум формулам

$$U_{12} = 2\mathcal{E} - 2Ir , \quad (5)$$

$$U_{12} = \mathcal{E} + (I - \Delta I)r , \quad (6)$$

откуда  $U_{12} = \frac{4}{3}\mathcal{E} - \frac{2}{3}\Delta Ir$ . Это означает, что система ведёт себя как одна батарейка с электродвижущей силой  $\frac{4}{3}\mathcal{E}$  и внутренним сопротивлением  $\frac{2}{3}r$ , которым в дальнейшем можно пренебречь. Заменим схему на эквивалентную схему (рис. 4). Из соображений симметрии  $I_1 = I_2$ .

Следовательно,

$$\mathcal{E} = U_{14} = I_1R + (I_1 + \Delta I)R , \quad (7)$$

$$I_1R = U_{13} = U_{12} + U_{23} = (I_2 + \Delta I)R - \frac{4}{3}\mathcal{E} , \quad (8)$$

откуда

$$I_1 = -\frac{1}{6}\frac{\mathcal{E}}{R} , \quad (9)$$

$$\Delta I = \frac{4}{3}\frac{\mathcal{E}}{R} . \quad (10)$$

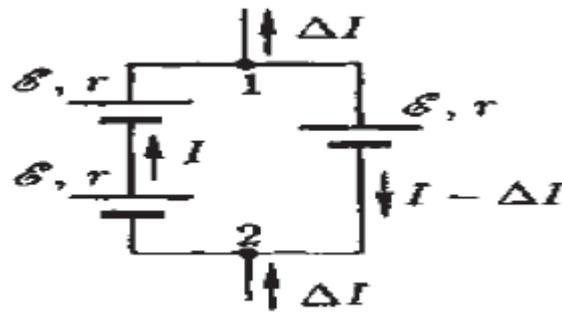


Рис. 3. Электрическая схема с тремя батарейками.

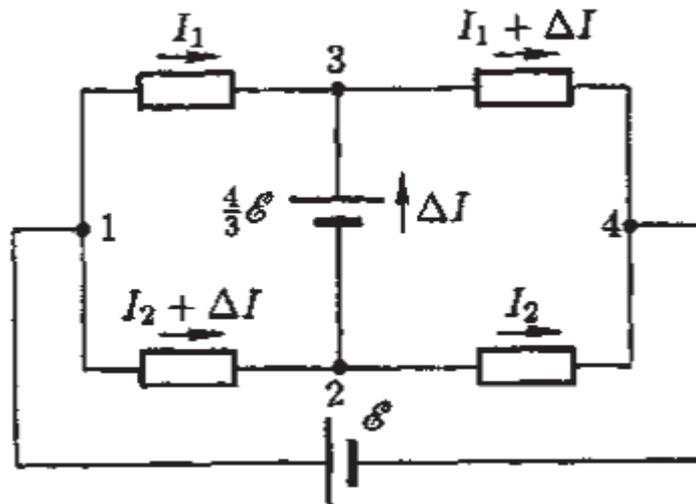


Рис. 4. Эквивалентная схема.

Таким образом, токи через резисторы

$$I_1 = I_2 = -\frac{1}{6} \frac{\mathcal{E}}{R}, \quad (11)$$

$$I_1 + \Delta I = I_2 + \Delta I = \frac{7}{6} \frac{\mathcal{E}}{R}. \quad (12)$$

### Задача 3. Зарядка-разрядка.

Экспериментатор Глюк собрал электрическую цепь (рис. 5), в которой все элементы можно считать идеальными. Конденсатор ёмкостью  $C$  не заряжен. Электродвижущая сила батареи задана. Ключ  $K$  замыкают, а затем размыкают в тот момент, когда скорость изменения энергии, запасённой в конденсаторе, составляет 75% от максимальной энергии. Найдите количество теплоты, выделившееся в электрической цепи при замыкании ключа.

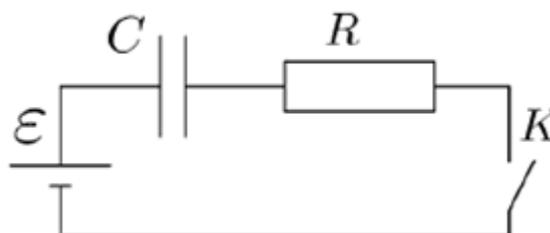


Рис. 5. Схема электрической цепи.

**Решение.**

Скорость изменения энергии конденсатора:

$$P = \frac{d}{dt} \left( \frac{q^2}{2C} \right) = \frac{q}{C} \frac{dq}{dt} = \frac{q}{C} I. \quad (13)$$

Здесь  $I$  – сила тока в электрической цепи,  $q$  – заряд на конденсаторе.

Запишем закон Ома для полной электрической цепи

$$\varepsilon = RI + \frac{q}{C}. \quad (14)$$

Работа батареи идёт на зарядку конденсатора и на тепловые потери на резисторе:

$$\varepsilon I = P + I^2 R. \quad (15)$$

Максимум мощности достигается при силе тока  $I = \varepsilon / (2R)$ .

Из уравнения (14) найдём электрический заряд на ёмкости:

$$q = C \left( \varepsilon - \frac{\varepsilon}{2R} R \right) = \frac{C\varepsilon}{2}. \quad (16)$$

Из (15) найдём максимальную скорость изменения энергии:

$$P_{\max} = \frac{\varepsilon^2}{4R}. \quad (17)$$

По условию в момент размыкания ключа

$$P = \frac{3}{16} \frac{\varepsilon^2}{R}. \quad (18)$$

Подставляя это выражение в уравнение (17) получим:

$$I^2 - \frac{\varepsilon}{R} I + \frac{3}{16} \left( \frac{\varepsilon}{R} \right)^2 = 0.$$

Решая это квадратное уравнение, найдём:

$$I = \frac{\varepsilon}{2R} \pm \sqrt{\frac{1}{4} \left( \frac{\varepsilon}{R} \right)^2 - \frac{3}{16} \left( \frac{\varepsilon}{R} \right)^2} = \frac{\varepsilon}{2R} \pm \frac{\varepsilon}{4R}.$$

$$I_1 = \frac{\varepsilon}{4R}, \quad (19)$$

$$I_2 = \frac{3\varepsilon}{4R}. \quad (20)$$

Из уравнения (14) найдём соответствующие заряды:

$$q_1 = \frac{3C\varepsilon}{4}, \quad q_2 = \frac{C\varepsilon}{4}.$$

Джоулево тепло, выделившееся на резисторе равно:

$$W = \left( q\varepsilon - \frac{q^2}{2C} \right). \quad (21)$$

Соответственно,

$$W_1 = \frac{24}{32}C\varepsilon^2 - \frac{9}{32}C\varepsilon^2 = \frac{15}{32}C\varepsilon^2, \quad W_2 = \frac{8}{32}C\varepsilon^2 - \frac{1}{32}C\varepsilon^2 = \frac{7}{32}C\varepsilon^2.$$

Таким образом, задача имеет два решения:

$$W_1 = \frac{15}{32}C\varepsilon^2, \quad W_2 = \frac{7}{32}C\varepsilon^2. \quad (22)$$

Ответ:  $W_1 = \frac{15}{32}C\varepsilon^2$ ,  $W_2 = \frac{7}{32}C\varepsilon^2$ .

#### Задача 4. Перезарядка конденсаторов

Экспериментатор Глюк собрал электрическую цепь из трёх одинаковых конденсаторов ёмкостью  $C$ , резистора сопротивлением  $R$  и диода, которая представлена на рис. 6. Вольт-амперная характеристика диода, включённого в электрическую цепь, представлена на рис. 7. Первоначально левый (на рис. 6) конденсатор заряжен до напряжения  $U_0$ , при этом заряд верхней пластины является положительным. Два других конденсатора не заряжены, ключ разомкнут. Затем ключ замыкают. Определите:

1. напряжение на конденсаторах через большой промежуток времени после замыкания ключа,
2. тепло, которое выделится в схеме к этому моменту времени,
3. тепло, выделившееся к этому моменту на диоде,
4. тепло, выделившееся к этому моменту на резисторе.

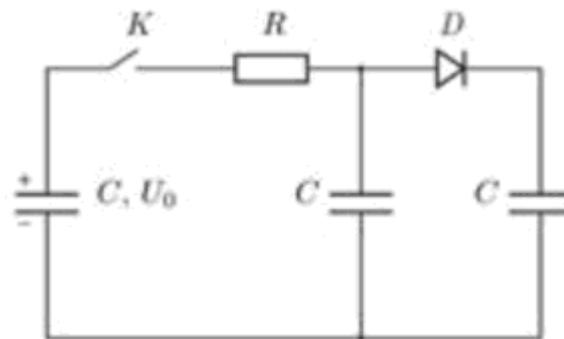


Рис. 6. Схема электрической цепи.

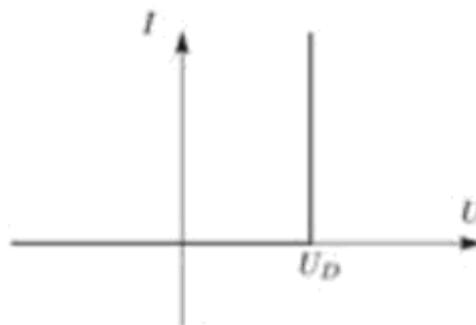


Рис. 7. Вольт-амперная характеристика диода.

**Решение.**

Нужно рассмотреть два случая: малых напряжений,  $U_0$  когда правый конденсатор вообще не будет заряжаться, так как напряжение на среднем конденсаторе не превзойдёт напряжение открытия диода  $U_D$ , и случая, когда заряжается и правый конденсатор. Если диод не открывается, то первоначальный заряд левого конденсатора делится поровну между двумя конденсаторами. Напряжения на конденсаторах через большой промежуток времени после замыкания ключа:

$$U_1 = \frac{U_0}{2}, \quad U_2 = \frac{U_0}{2}, \quad U_3 = 0 \quad \dots$$

Видно, что этот случай реализуется при  $U_D \geq U_0/2$ . Выделившееся в цепи количество теплоты  $Q$  найдём из закона сохранения энергии:

$$Q = \frac{CU_0^2}{2} - 2 \frac{C(U_0/2)^2}{2} = \frac{CU_0^2}{4}.$$

Поскольку ток через диод не протекал, всё тепло выделилось на резисторе.

Теперь рассмотрим случай  $U_D \leq U_0/2$ . При зарядке правого конденсатора напряжение на нём  $U_3$  будет меньше, чем напряжение на среднем  $U_2$  на величину  $U_D$ . Напряжения на левом и среднем конденсаторах  $U_1$  и  $U_2$  к окончанию перезарядки будут равными:

$$U_1 = U_2 = U.$$

Условие сохранения заряда:

$$CU_0 = 2CU + C(U - U_D),$$

откуда

$$U = \frac{U_0 + U_D}{3}.$$

Общее количество теплоты, выделившееся к концу процесса в схеме будет равно разности начальной и конечной энергий конденсаторов:

$$Q = \frac{CU_0^2}{2} - 2 \frac{CU^2}{2} - \frac{C(U - U_D)^2}{2} = \frac{C(U_0^2 - U_D^2)}{3}.$$

Напряжение на третьем конденсаторе:

$$U_3 = U - U_D = \frac{(U_0 - 2U_D)}{3}.$$

Тепло, выделившееся на диоде

$$Q_D = q_D U_D,$$

где  $q_D = CU_3$  – заряд правого конденсатора к концу процесса перезарядки. Таким образом

$$Q_D = \frac{C(U_0 U_D - 2U_D^2)}{3}.$$

Остальное тепло выделится на резисторе:

$$Q_R = Q - Q_D = \frac{C(U_0^2 - U_0 U_D + U_D^2)}{3}.$$

## Задача 5. Конденсаторы

Экспериментатор Глюк собрал электрическую цепь, показанную на рис. 8. Параметры собранной электрической цепи указаны на схеме (рис. 8). Вначале ключ К разомкнут.

1. Определите напряжение на конденсаторе ёмкостью  $C$ .
2. Определите силу тока, который потечёт через резистор сопротивлением  $3R$ , сразу после замыкания ключа К.
3. Какое напряжение установится на конденсаторе ёмкостью  $C$  после того, как переходные процессы в цепи завершатся?

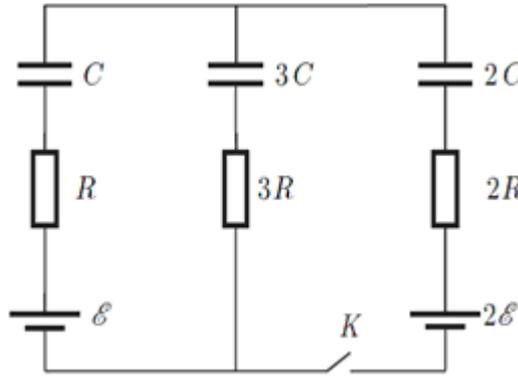


Рис. 8. Схема электрической цепи.

**Решение.**

1. В самом начале в замкнутом контуре, состоящем из ёмкостей  $C$  и  $3C$ , ток не протекал. На рис. 9 изображена эквивалентная схема этой цепи. Суммарный заряд, сосредоточенный на верхних обкладках конденсаторов  $C$  и  $3C$ , равен нулю.

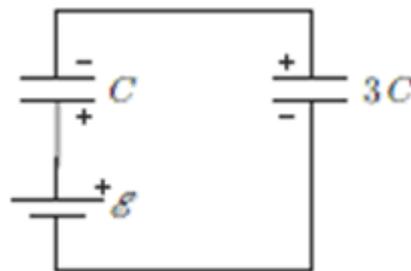


Рис. 9. Схема электрической цепи.

Значит,  $\varepsilon = \frac{q}{C} + \frac{q}{3C} = \frac{4q}{3C}$ . После алгебраических преобразований найдём искомое напряжение:

$$U_C = \frac{q}{C} = \frac{3}{4}\varepsilon .$$

2. Сразу после замыкания ключа К, заряд и напряжение на конденсаторе  $2C$  равны нулю. Согласно второму закону Кирхгофа для контура 1 (рис. 10) запишем:

$$\varepsilon = -I_1R + U_C + U_{3C} + I_33R . \tag{23}$$

Поскольку  $\varepsilon = U_C + U_{3C}$ , уравнение (23) примет вид:

$$I_1R = I_33R ,$$

или

$$I_1 = 3I_3 .$$

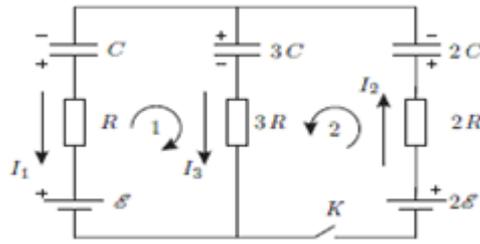


Рис. 10. Схема электрической цепи.

Согласно второму закону Кирхгофа для контура 2 запишем:

$$2\varepsilon = I_2 2R + U_{3C} + I_3 3R ,$$

или

$$\frac{7\varepsilon}{4R} = 2I_2 + 3I_3 .$$

По первому закону Кирхгофа  $I_2 = I_1 + I_3 = 4I_3$ . Тогда

$$I_3 = \frac{7\varepsilon}{44R} . \tag{24}$$

3. После того, как переходные процессы завершатся, ток по контурам течь не будет. На рис. 11 изображена эквивалентная схема этой цепи. Суммарный заряд, сосредоточенный на верхних обкладках конденсаторов  $C$ ,  $2C$  и  $3C$ , равен нулю:  $q_1 + q_2 = q_3$ .

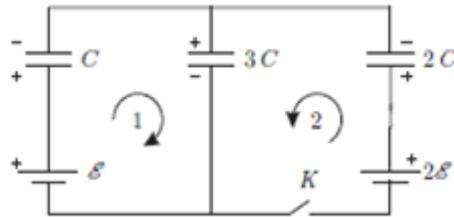


Рис. 11. Схема электрической цепи.

Для контура 1 имеем

$$\varepsilon = \frac{q_1}{C} + \frac{q_3}{3C} , \tag{25}$$

Для контура 2 имеем

$$2\varepsilon = \frac{q_2}{2C} + \frac{q_3}{3C} . \tag{26}$$

Решая полученную систему уравнений, найдём

$$q_1 = \frac{1}{6}C\varepsilon , \quad U_1 = \frac{q_1}{C} = \frac{1}{6}\varepsilon . \tag{27}$$

### Задача 6. Заряженный конденсатор

Экспериментатор Глюк собрал электрическую цепь, показанную на рис. 12). В этой электрической цепи конденсатор  $C$  заряжен до напряжения  $3\varepsilon$ . Затем ключ  $K$  замыкают.

Найдите:

1. максимальную силу тока в цепи,
2. силу тока в цепи в момент времени, когда заряд на конденсаторе становится равным нулю,

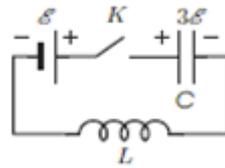


Рис. 12. Схема электрической цепи.

3. заряд на конденсаторе в момент времени, когда сила тока в цепи становится равной нулю.

Все элементы можно считать идеальными.

**Решение.**

1) Начальный заряд на конденсаторе  $q_0 = 3C\varepsilon$ . После замыкания ключа ток течет против электродвижущей силы. Максимальной сила тока будет тогда, когда заряд на конденсаторе будет равен  $q = C\varepsilon$ . Электродвижущая сила совершит отрицательную работу. Запишем закон сохранения энергии:

$$(q - q_0) \varepsilon = \frac{q^2}{2C} - \frac{q_0^2}{2C} + \frac{LI_{\max}^2}{2}, \tag{28}$$

$$I_{\max} = \varepsilon \sqrt{\frac{4C}{L}}.$$

2) На конденсаторе заряда нет. Поэтому электродвижущая сила совершает работу  $= -\varepsilon q_0$ .

Запишем закон сохранения энергии:

$$-\varepsilon q_0 = -\frac{q_0^2}{2C} + \frac{LI^2}{2}. \tag{29}$$

Отсюда  $I = \varepsilon \sqrt{\frac{3C}{L}}$ .

3) Пусть против электродвижущей силы протекает положительный заряд  $q$  и  $\ell = 0$ . Запишем закон сохранения энергии:

$$-\varepsilon q = \frac{(q_0 - q)^2}{2C} - \frac{q_0^2}{2C}. \tag{30}$$

Одно из решений  $q = 0$  совпадает с начальным положением системы. Заряд на конденсаторе при этом равен  $Q_1 = 3C\varepsilon$ . Второе решение  $q = 4C\varepsilon$  соответствует случаю, когда заряд на конденсаторе равен  $Q_2 = q_0 - q = -C\varepsilon$ .

Знак заряда противоположный начальному. То есть

$$Q_1 = 3C\varepsilon, \tag{31}$$

$$Q_2 = -C\varepsilon. \tag{32}$$

**Задача 7. Цепь с конденсатором**

Экспериментатор Глюк собрал электрическую цепь, показанную на рис. 13. Электрическая схема (рис. 13) состоит из источника постоянного тока с электродвижущей силой  $\varepsilon$  и внутренним сопротивлением  $r$ , конденсатора ёмкостью  $C$  и резистора  $R$ . В начальный момент конденсатор не заряжен.

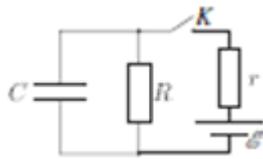


Рис. 13. Схема электрической цепи.

Ключ К в схеме сначала замыкают, а затем размыкают в тот момент, когда скорость изменения энергии, запасённой в конденсаторе, достигает максимума. Какое количество теплоты выделится в схеме после размыкания ключа?

**Решение.**

Энергия, запасённая в конденсаторе,  $W = q^2/(2C)$ , где  $q$  – заряд на обкладках конденсатора, а  $C$  – ёмкость конденсатора.

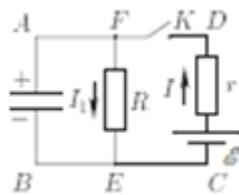


Рис. 14. Схема электрической цепи.

Дифференцируя выражение для энергии по времени, получим:

$$\frac{dW}{dt} = P = UI_C . \tag{33}$$

Запишем второе правило Кирхгофа для контура ABCD (рис.14), обозначая через  $I$  силу тока, текущего через резистор  $r$ :

$$Ir + U = \varepsilon , \tag{34}$$

откуда

$$I = (\varepsilon - U) / r . \tag{35}$$

Применяя второе правило для контура ABEF, получим:

$$U = (I - I_C) R , \tag{36}$$

где учтено, что сила тока  $I_R$ , текущего через резистор  $R$ , равна  $I_R = I - I_C$ .

Подставим в (36) выражение из (35). Тогда

$$I_C = \frac{dq}{dt} = \frac{\varepsilon R - U(R + r)}{Rr} . \tag{37}$$

Исследуем на максимум произведение

$$U \frac{dq}{dt} = U \frac{\varepsilon}{r} - U^2 (R + r) / Rr . \tag{38}$$

Это квадратный многочлен, представляющий из себя уравнение параболы, ветви которой направлены вниз. Его значение достигает максимума в вершине параболы, то есть при

$$U = \frac{R}{2(R + r)} \varepsilon . \tag{39}$$

Такое же напряжение будет на конденсаторе в момент размыкания ключа. Тогда количество теплоты, выделившееся в цепи после размыкания ключа, равно

$$Q = W = \frac{CU^2}{2} = \frac{C\varepsilon^2}{8} \left( \frac{R}{R+r} \right)^2. \quad (40)$$

### Задача 8. Нелинейный элемент

Экспериментатор Глюк собрал электрическую цепь, изображённую на рис. 15, которая состоит из батареи с электродвижущей силой  $\varepsilon = 10$  В, резистора сопротивлением  $R = 100$  Ом, конденсатора ёмкости  $C = 8$  мкФ и нелинейного элемента, вольт-амперная характеристика которого изображена на рис. 16. В некоторый момент времени ключ К замыкается. Предполагая, что сила тока, протекающего через нелинейный элемент в любой момент времени много меньше силы тока, протекающего через батарею, определите количество теплоты, выделившейся на нелинейном элементе.

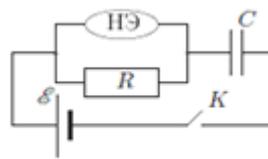


Рис. 15. Схема электрической цепи.

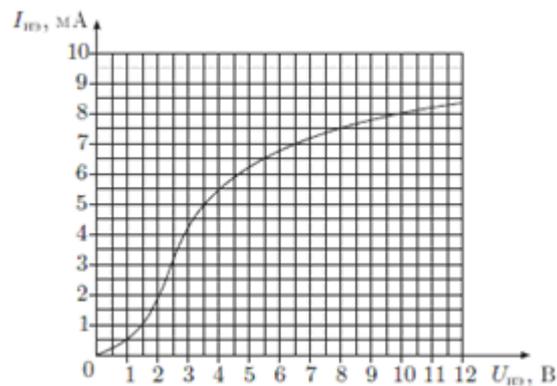


Рис. 16. Вольт-амперная характеристика нелинейного элемента.

### Решение.

Пусть  $q$  – заряд конденсатора. По закону Ома  $U_n + \frac{q}{C} = \varepsilon$ , следовательно, получаем  $dq = -CdU_n$ . Рассмотрим малый отрезок времени  $dt$ :

$$dq = \left( I_n + \frac{U_n}{R} \right) dt,$$

следовательно, можно выразить

$$dt = \frac{dq}{I_n + \frac{U_n}{R}} \approx -\frac{RCdU_n}{U_n},$$

так как  $I_n \ll \frac{U_n}{R}$ .

Выделившееся на нелинейном элементе количество теплоты равно:

$$Q = \int_0^\infty U_n I_n dt \approx -RC \int_{10}^0 I_n dU_n,$$

так как при протекании электрического тока напряжение на нелинейном элементе изменяется от  $\varepsilon$  в первый момент времени до нуля по окончании зарядки конденсатора. Поэтому  $Q = RCS$ , где  $S$  – площадь под графиком вольт-амперной характеристики. По графику определяем, что  $S = (51.5 \pm 0.5)$  мВт значит  $Q = (41.2 \pm 0.4)$  мкДж.

**Задача 9. Цепь и соленоид**

Экспериментатор Глюк собрал электрическую цепь, изображённую на рис. 17, которая состоит из двух резисторов сопротивлениями  $R_1$  и  $R_2$  и конденсатора ёмкостью  $C$ . Участок АВ провода проходит вдоль диаметра одного из витков длинного соленоида, сила тока в котором линейно растёт со временем. Найдите электрический заряд  $q$  конденсатора в установившемся режиме в электрической цепи, если электрический ток в резисторе  $R_1$  при этом равен  $I_1$ .

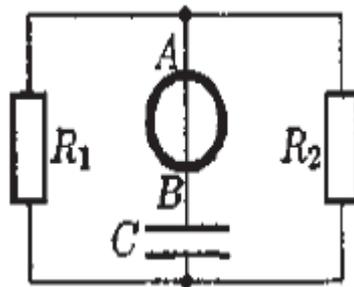


Рис. 17. Электрическая цепь с соленоидом.

**Решение.**

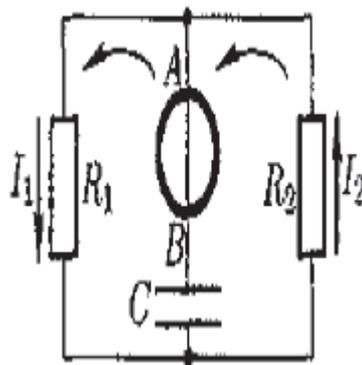


Рис. 18. Электрическая цепь с соленоидом с расстановкой токов в цепи.

Из-за изменения магнитного поля в каждом контуре возникает электродвижущая сила индукции, равная скорости изменения потока через этот контур. Пусть  $\mathcal{E}$  – электродвижущая сила в контуре, содержащем  $R_1$  и  $C$  (рис. 18), тогда в контуре, содержащем  $R_1$  и  $R_2$ , ЭДС равна  $2\mathcal{E}$ . Запишем второе правило Кирхгофа для этих контуров:

$$\mathcal{E} = I_1 R_1 + \frac{q}{C}, \tag{41}$$

$$2\mathcal{E} = I_1 R_1 + I_2 R_2. \tag{42}$$

В установившемся режиме заряд конденсатора постоянен, ток через него не идёт, и, следовательно,  $I_1 = I_2$ . Решая уравнение, находим

$$q = \frac{1}{2} C I_1 (R_2 - R_1). \tag{43}$$

**Задача 10. Заряд, полый шар и диэлектрик**

Теоретик Баг поместил маленький шарик, обладающий электрическим зарядом  $Q$ , в центр закреплённого незаряженного проводящего полого шара с радиусами концентрических поверхностей  $R_1$  и  $R_2$  ( $R_1 < R_2$ ). Полый шар окружён снаружи концентрическим слоем диэлектрика с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon$  и радиусом наружной поверхности  $R_3$  (рис. 19). Какую минимальную работу нужно совершить, чтобы удалить шарик через узкий канал в слоях проводника и диэлектрика на расстояние от полого шара, значительно большее  $R_3$ ?

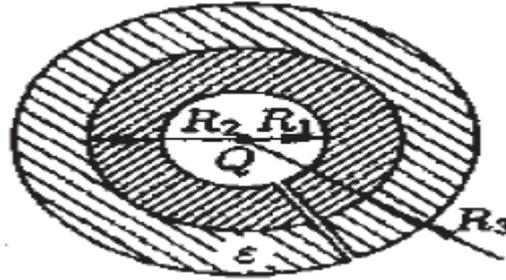


Рис. 19. Система, состоящая из заряда, полого шара и диэлектрика.

**Решение.**

Минимальная работа для удаления шарика через узкий канал в слоях проводника и диэлектрика равна изменению энергии электрического поля. Сравнив мысленно картины полей в начале и в конце опыта, можно заключить, что это изменение энергии есть разность  $W_1 - W_2$ , где  $W_1$  – энергия поля в слое диэлектрика с радиусами поверхностей  $R_2$  и  $R_3$  (поле создано зарядом  $Q$ , помещённым в центр этого слоя),  $W_2$  – энергия поля в «пустом» объёме между сферами с радиусами  $R_1$  и  $R_3$  (поле создано зарядом  $Q$ , помещённым в общий центр этих сфер). Энергии  $W_1$  и  $W_2$  удобно искать как энергии соответствующих сферических конденсаторов с ёмкостями  $C_1$  и  $C_2$ , имеющих на обкладках заряд  $Q$ .

Найдём  $C_2$  и  $W_2$ . Напряжение на конденсаторе с радиусами  $R_1$  и  $R_3$ :

$$U = \left( k \frac{Q}{R_1} + k \frac{-Q}{R_3} \right) - 0 = kQ \frac{R_3 - R_1}{R_1 R_3}, \tag{44}$$

где  $k = 1 / (4\pi\varepsilon_0)$ . Ёмкость конденсатора

$$C_2 = \frac{Q}{U} = \frac{R_1 R_3}{k (R_3 - R_1)}, \tag{45}$$

то энергия

$$W_2 = \frac{Q^2}{2C_2} = \frac{kQ^2 (R_3 - R_1)}{2R_1 R_3}. \tag{46}$$

Аналогично находим

$$C_1 = \frac{Q}{U} = \frac{\varepsilon R_2 R_3}{k (R_3 - R_2)}, \tag{47}$$

$$W_1 = \frac{kQ^2 (R_3 - R_2)}{2\varepsilon R_2 R_3}. \tag{48}$$

Искомая работа равна

$$A = W_2 - W_1 = \frac{kQ^2}{3R_3} \left( \frac{R_3 - R_1}{R_1} - \frac{R_3 - R_2}{\varepsilon R_2} \right). \tag{49}$$

### Задача 11. Система из двух проводников с перемычкой

Экспериментатор Глюк исследовал систему, состоящую из двух параллельных проводников с перемычкой. Есть система, состоящая из двух параллельных проводников, перемычки и двух электрических конденсаторов. Перемычка способна перемещаться вдоль параллельных проводников, у которых скорость является постоянной величиной  $v = 10 \text{ м/с}$ . Расстояние между двумя параллельными проводниками составляет  $\ell = 0.5 \text{ м}$ . В систему последовательных соединением включили два конденсатора между параллельными проводниками, причём известно отношение электрических ёмкостей включённых в цепь электрических конденсаторов  $n = C_2/C_1 = 1.5$ . Вся система помещена во внешнее магнитное поле, которое с течением времени сохраняет постоянное значение вектора индукции магнитного поля. Вектор индукции магнитного поля ориентирован перпендикулярно плоскости, в которой лежат параллельные проводники и перемычка. Определите значение модуля вектора индукции магнитного поля, если на электрическом конденсаторе  $C_2$  напряжение равно  $U = 0.5 \text{ В}$ .

**Решение.**

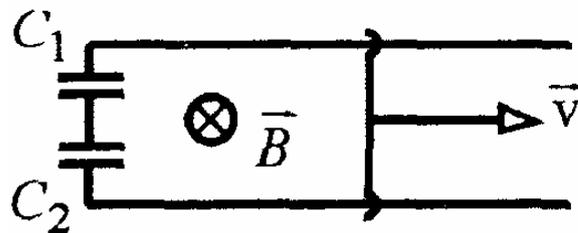


Рис. 20. Система, состоящая из двух параллельных проводников, перемычки и двух электрических конденсаторов.

На рис. 20 изображена система, состоящая из двух параллельных проводников, перемычки и двух электрических конденсаторов, которая находится во внешнее магнитное поле.

Применим закон электромагнитной индукции Фарадея для вычисления электродвижущей силы индукции. Тогда выражением модуля электродвижущей силы индукции, возникающей при перемещении перемычки в постоянном магнитном поле с индукцией  $B$ , вычислим по формуле

$$|\mathcal{E}| = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{B\Delta S}{\Delta t} = \frac{B\ell v\Delta t}{\Delta t} = B\ell v. \quad (50)$$

Общая ёмкость системы, состоящей из соединённых последовательно двух электрических конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$ , равна

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = \frac{C_2}{1 + (C_2/C_1)} = \frac{C_2}{1 + n}. \quad (51)$$

Затем вычислим заряд, накопленный конденсаторами, согласно выражению

$$q = C\mathcal{E} = \frac{C_2}{1 + n} B\ell n. \quad (52)$$

Следовательно, можно найти модуль индукции магнитного поля

$$B = \frac{(1 + n) q}{\ell v C_2}. \quad (53)$$

Но при последовательном соединении конденсаторов для зарядов на каждом электрическом конденсаторе выполняется  $q = q_2 = C_2 U$ , где  $q_2$  заряд на ёмкости  $C_2$ . Отсюда получаем выражение для определения модуля индукции магнитного поля

$$B = \frac{(1+n)U}{lv}. \quad (54)$$

Подсчитывая численное значение модуля индукции магнитного поля, получим  $B = 0.25$  Тл.

Ответ:  $B = \frac{(1+n)U}{lv} = 0.25$  Тл.

### Задача 12. Электромагнитная пушка

Теоретик Баг построил электромагнитную пушку необычной конструкции на основе длинного соленоида. В длинном соленоиде радиусом  $r$  создано однородное магнитное поле с индукцией  $B_0$ , направленной вдоль оси  $O$  цилиндра (рис. 21). На расстоянии  $R_0$  от оси, перпендикулярно оси, укреплена прямолинейная трубка  $AM$  из диэлектрика. Угол  $AOM$  равен  $\alpha = \pi/3$ . Длина трубки значительно меньше длины соленоида. Внутри трубки в точке  $A$  находится небольшой шарик массой  $m$  с положительным электрическим зарядом  $q$ . Найдите скорость шарика в момент вылета из трубки в следующих случаях.

1. Магнитное поле исчезает за малое время, в течение которого шарик смещается на расстояние, значительно меньше  $R_0$ .

2. Индукция магнитного поля уменьшается с постоянной скоростью  $dB/dt = -k < 0$  в течение всего времени движения шарика по трубке.

Трением и электромагнитным действием трубки на шарик пренебречь.

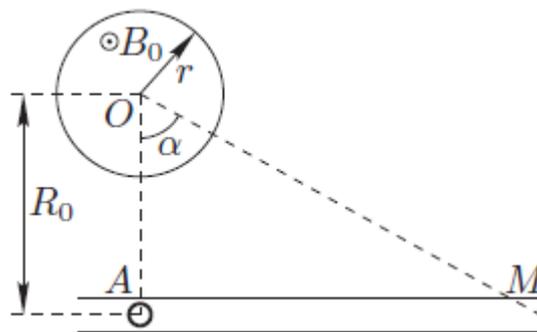


Рис. 21. Электромагнитная пушка.

### Решение.

1. Разобьём время выключения поля на сколь угодно малые интервалы времени. Пусть магнитный поток через поперечное сечение соленоида за один из таких интервалов длительностью  $\Delta t$  изменился на  $\Delta\Phi$ . Тогда напряжённость вихревого электростатического поля в точке  $A$  направлена вдоль трубки и равна

$$E = \frac{-\Delta\Phi}{2\pi R_0 \Delta t}. \quad (55)$$

Сила, действующая на шарик,  $F = qE$ . Поскольку  $F\Delta t = m\Delta v$ , где  $\Delta v$  изменение скорости, то

$$-\frac{q}{2\pi R_0} \Delta\Phi = m\Delta v. \quad (56)$$

Суммирование данных уравнений за всё время включения поля даёт:

$$-\frac{q}{2\pi R_0} \sum \Delta\Phi = m \sum \Delta v. \quad (57)$$

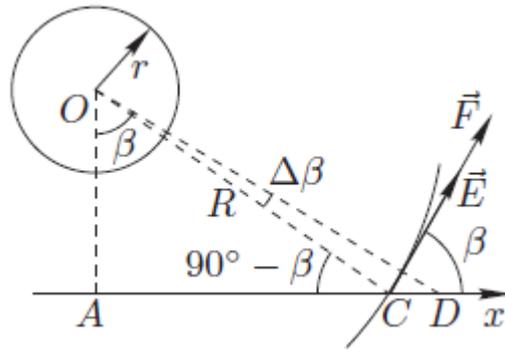


Рис. 22. Электромагнитная пушка.

У нас

$$\sum \Delta\Phi = 0 - B_0\pi r^2 = -B_0\pi r^2, \quad (58)$$

$$\sum \Delta v = v_1. \quad (59)$$

Шарик вылетает из трубки со скоростью, равной скорости  $v_1$ , полученной в точке A:

$$v_1 = \frac{r^2 q B_0}{2mR_0}. \quad (60)$$

2. Направим ось  $Ox$  вдоль оси трубки (рис. 22). Пусть в произвольный момент времени при движении шарик находится в точке  $C$  на расстоянии  $R$  от оси соленоида, имеет скорость  $v$  и его положение  $x$  характеризуется углом  $\beta$ . Напряжённость вихревого электрического поля в точке  $C$

$$E = \frac{\pi r^2 |dB/dt|}{2\pi R} = \frac{kr^2}{2R}. \quad (61)$$

На шарик действует сила  $F = qE$ , её проекция на ось  $Ox$ :  $F_x = F \cos \beta$ . За малое время  $\Delta t$  шарик переместится на расстояние  $CD = v\Delta t$ , получив приращение скорости  $\Delta v$ , причём  $F_x \Delta t = m\Delta v$ . Имеем, с учётом выражений для  $F_x$ ,  $F$  и  $E$ :

$$\frac{kr^2 q \Delta t}{2R} \cos \beta = m\Delta v. \quad (62)$$

По теореме синусов для треугольника  $OCD$ :

$$v\Delta t \approx \frac{\Delta\beta}{\sin(\pi/2 - \beta)}. \quad (63)$$

Отсюда  $\Delta t \cos \beta / R = \Delta\beta / v$ . С учётом последнего соотношения равенство (62) принимает вид

$$kr^2 q \Delta\beta = 2mv\Delta v. \quad (64)$$

Поскольку  $2v\Delta v = \Delta v^2$ , то  $kr^2 q \Delta\beta = m\Delta v^2$ . У нас

$$\sum \Delta\beta = \frac{\pi}{3} - 0 = \frac{\pi}{3}, \quad (65)$$

$$\sum \Delta(v^2) = v_2^2 - 0 = v_2^2. \quad (66)$$

Шарик вылетит из трубки со скоростью

$$v_2 = \sqrt{\frac{\pi k r^2 q}{3m}}. \quad (67)$$

## Результаты педагогического эксперимента

Целью педагогического эксперимента было выявление в экспериментальном классе одарённых учеников и дальнейшее развитие творческого потенциала учеников, проявивших склонности к решению олимпиадных задач.

Местом проведения педагогического эксперимента по апробации системы олимпиадных задач по физике является МБОУ «Средняя школа № 85 г. Ульяновска», находящийся по адресу г. Ульяновск, ул. Ефремова 145А. Сроки проведения педагогического эксперимента по апробации системы олимпиадных задач по физике: с 22.10.2018 по 20.12.2019. Объектом педагогического эксперимента является 11 А класс (профильный), состоящий из 27 человек и 11 Б класс, состоящий из 28 человек.

Проведём описание одного из экспериментальных классов. Все педагогические исследования проводились в технологическом классе МБОУ СШ № 85 г. Ульяновска в 11 Б классе. В этом классе всего 27 учащихся, из них 13 девочек, 14 мальчиков. Большинство детей 2002 года рождения. В целом дети воспитываются в хороших семьях, где родители уделяют должное внимание своим детям. По результатам медицинского обследования все дети здоровы. У некоторых детей имеются незначительные нарушения речи.

В классе шесть учеников имеют высокий уровень успеваемости по всем предметам. Успевают на оценки 4 и 5 девять человек. Успевают с одной тройкой три человека. Успевают на тройки, четверки и пятёрки по разным предметам девять человек. Неудачников учащихся в классе нет. Абсолютная успеваемость составляет 100%, качественная успеваемость 56%.

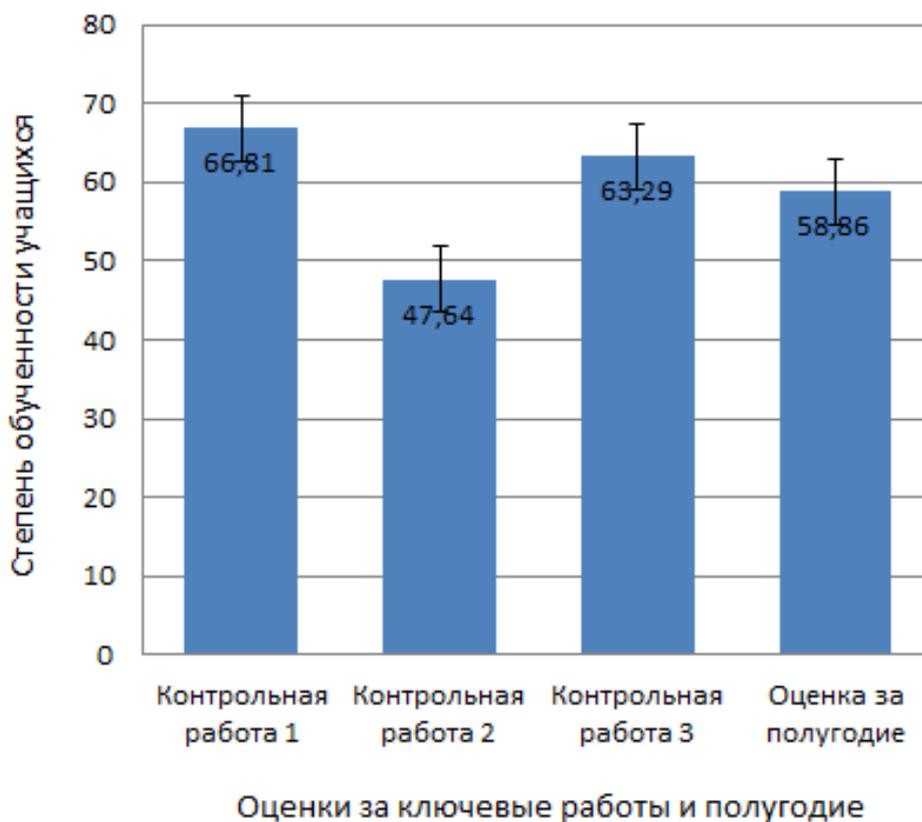


Рис. 23. Гистограмма распределения количества оценок за ключевые работы и полугодие учеников 11 Б класса из экспериментальной группы.

На рис. 23 изображена гистограмма распределения количества оценок за ключевые работы и полугодие учеников 11 Б класса из экспериментальной группы. Гистограмма,

изображённая на рис. 23, показывает распределение оценок по основным контрольным работам, проводимым в первом полугодии 11 класса и общая оценка за первое полугодие. Первая контрольная работа проводилась в начале первого полугодия по теме «Электромагнитная индукция». Вторая контрольная работа проводилась в середине первого полугодия по теме «Переменный электрический ток». И третья контрольная работа проводилась в конце первого полугодия по теме «Электромагнитные волны». В ходе подготовки к контрольным работам использовались физические задачи разного уровня, включая задачи олимпиадного типа. Кроме того, у учеников было много самостоятельных работ и на основании этого выставлена оценка за первое полугодие.

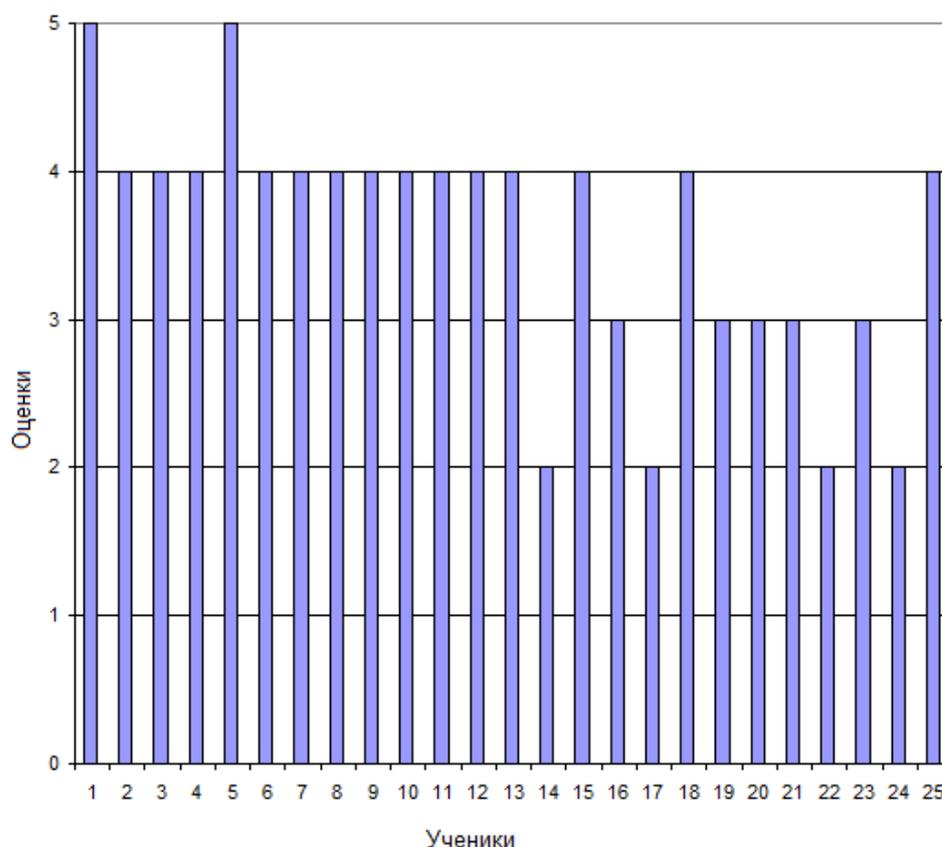


Рис. 24. Гистограмма распределения оценок на контрольной работе 1 от 27.09.2019 учеников 11 Б класса из экспериментальной группы.

На рис. 24 изображена гистограмма распределения оценок на контрольной работе 1 от 27.09.2019 учеников 11 Б класса из экспериментальной группы.

В классе есть дети, которые отличаются неординарным мышлением, феноменальной памятью, сообразительностью и находчивостью. Таких было выделено шесть человек. Девочки увлекаются музыкой, мальчики в классе спортивные, практически все посещают спортивную секцию, большинство детей посещают различные кружки во внеурочное время. Класс активный, дети принимают активное участие во всех школьных мероприятиях, у некоторых детей есть выраженные черты. Многие из учащихся хорошо рисуют, принимают участие в художественных конкурсах.

Учебная мотивация носит разнообразный характер. На уроках желательно развивать интерес детей к предметам, поощрять их самостоятельными занятиями дома. На уроках дети активны, хорошо воспринимают материал, на переменах подвижны. Учащиеся умеют работать совместно. При решении коллективных задач быстро ориентируются, находят общий язык. В целом учащиеся хорошо знают друг друга, отношения между ними доброжелательные.

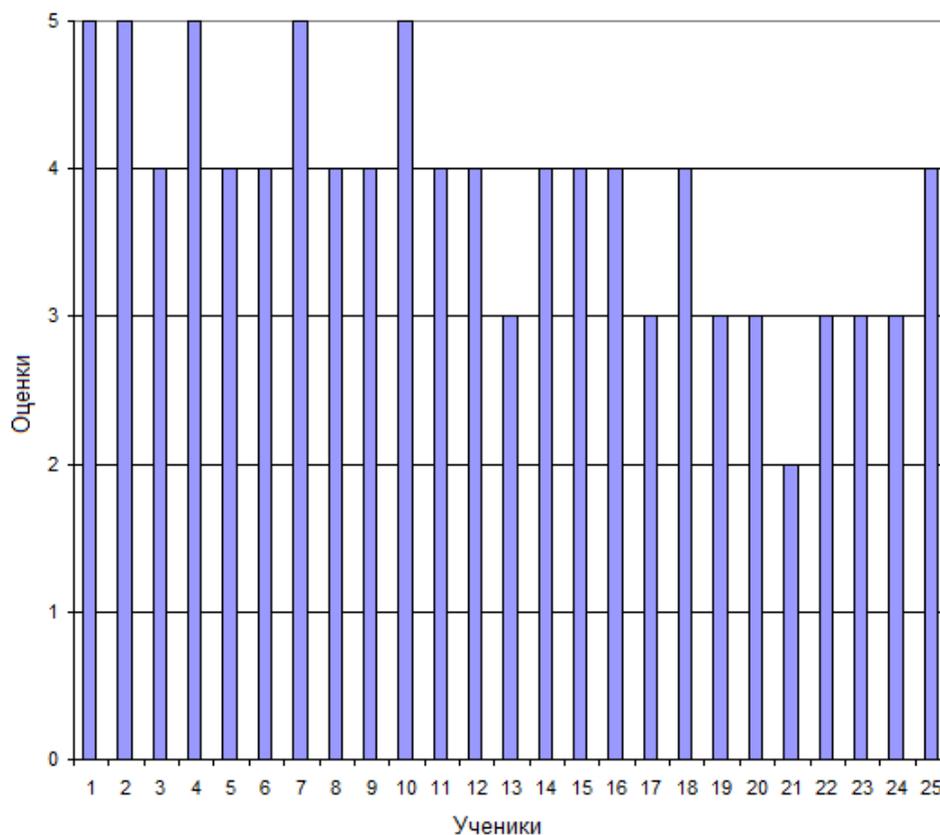


Рис. 25. Гистограмма распределения оценок на контрольной работе 2 от 7.11.2019 учеников 11 Б класса из экспериментальной группы.

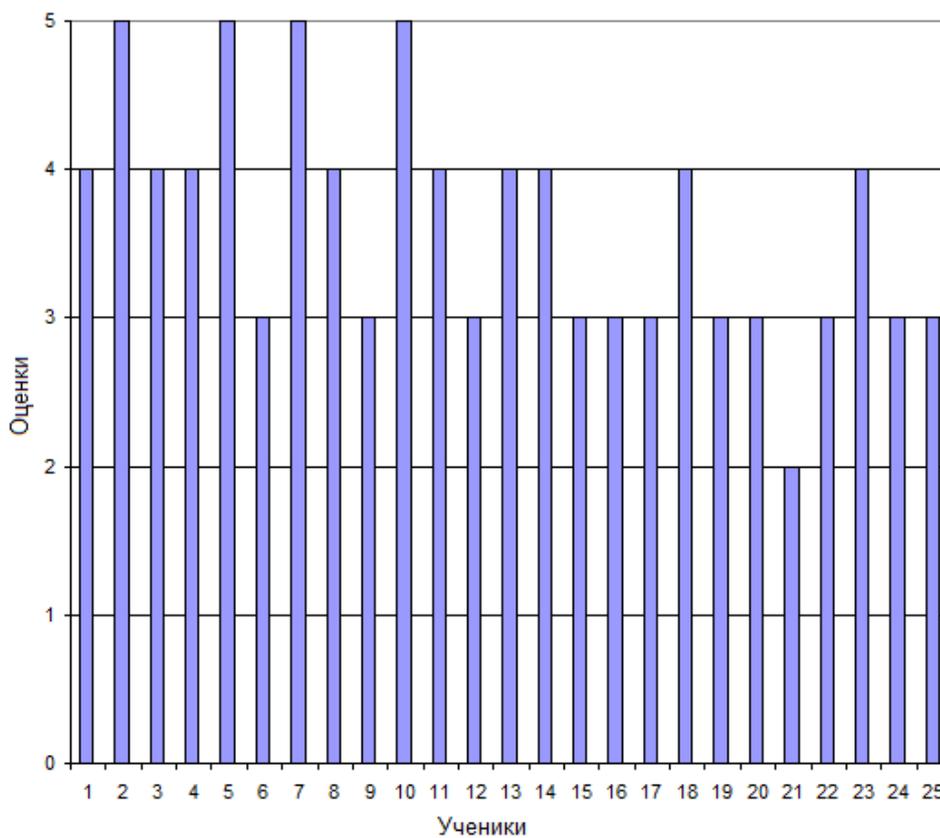


Рис. 26. Гистограмма распределения оценок на контрольной работе 3 от 3.12.2019 учеников 11 Б класса из экспериментальной группы.

## Заключение

В работе создана и апробирована система олимпиадных задач по электродинамике, направленная на практическую реализацию одной из приоритетных задач современного школьного образования по физике, заключающуюся в качественной подготовке по физике. В процессе выполнения работы была создана система задач и заданий по электродинамике для подготовки к олимпиадам по физике учащихся 11 классов. В ходе выполнения работы проведён педагогический эксперимент, который показал эффективность системы подготовки учащихся к олимпиадам по физике. Разработанная система олимпиадных задач по физике позволяет проводить эффективную подготовку к решению олимпиадных задач по физике. Подготовка в традиционной форме, которая организована систематически и планомерно, в сочетании с использованием информационных технологий позволяет организовать эффективную подготовку одарённых учащихся к олимпиадам по физике. Систематическая подготовка по физике, организованная в традиционной форме, в сочетании с использованием информационных компьютерных технологий позволяет организовать эффективную подготовку при изучении электродинамики к олимпиадам по физике различного уровня.

Гипотеза исследования, состоящая в том, что если использовать систему олимпиадных задач по электродинамике в систематически организованной подготовке в традиционной форме в сочетании с использованием информационных технологий, то можно создать эффективную систему подготовки к олимпиадам по физике в общеобразовательной школе, подтверждена полностью.

В результате педагогического эксперимента показано, что разработанная система олимпиадных задач по электродинамике позволяет проводить эффективную подготовку к решению олимпиадных задач по физике. В рамках теоретической части работы была разработана система олимпиадных задач по физике для 11 класса. Разработанная система задач по электродинамике на практике показала хорошие результаты при подготовке учащихся к олимпиадам по физике. Это факт служит следствием того, что разработанная система задач по электродинамике для 11 класса способствует развитию мышления учащихся, их подготовке к участию в олимпиадах и творческих поисках; воспитывает трудолюбие, настойчивость, волю, целеустремлённость и является хорошим средством контроля над знаниями, умениями и навыками.

## Список использованных источников

1. Алтунин К. К., Лушникова Ю. О., Назарова Т. В. Электронный курс по олимпиадным задачам по физике // В сборнике: Актуальные вопросы преподавания технических дисциплин. Материалы Всероссийской научно-практической конференции. — 2018. — С. 6–8.
2. Алтунин К. К., Лушникова Ю. О., Назарова Т. В. Электронный курс по олимпиадным задачам по физике // Наука online. — 2018. — № 2 (3). — С. 53–69.
3. Каменецкий С. Е., Орехов В. П. Методика решения задач по физике в средней школе. Пособие для учителей. — Москва : Просвещение, 1971. — 448 с.
4. Каменецкий С. Е., Солодухин Н. А. Модели и аналогии в курсе средней школы: пособие для учителей. — Москва : Просвещение, 1982. — 96 с.
5. Орехов В. П., Усова А. В. Методика преподавания физики в 8-10 классах средней школы. Часть 2. — Москва : Просвещение, 1980. — 350 с.

6. Резников Л. И., Шамаш С. Я., Эвенчик Э. Е. Методика преподавания физики в средней школе : механика : пособие для учителей. — Москва : Просвещение, 1974. — 238 с.
7. Шаповалов А. А. Размышления при решении физических задач. — Барнаул : Издательство БГПУ, 2001. — 150 с.
8. Разумовский В. Г., Браверман Э. М. Урок физики в современной школе (творческий поиск учителя). — Москва : Просвещение, 1993. — 288 с.
9. Елизаров К. Н. Вопросы методики преподавания физики в средней школе : пособие для учителей. — Москва : Учпедгиз, 1962. — 240 с.
10. Абросимов Б. Ф. Способы и методы поиска решения задач: учебно-методическое пособие. — Москва : Экзамен, 2006. — 287 с.
11. Дегтярев С. Н. Креативные методы и эвристические приёмы решения физических задач. — Тюмень : ТОГИРРО, 2009. — 28 с.
12. Красин М. С. Решение сложных и нестандартных задач по физике. Эвристические приёмы поиска решений. — Москва : ИЛЕКСА, 2008. — 360 с.
13. Красин М. С. Система эвристических приёмов решения задач по физике. Теория, методика, примеры: учебно-методическое пособие. — Калуга : Калужский государственный университет им. К.Э. Циолковского, 2009. — 147 с. — ISBN: 978-5-88725-176-9.
14. Ильясов И. И. Система эвристических приёмов решения задач. — Москва : Издательство Российского открытого университета, 1992. — 138 с.
15. Козырева Н. А. Педагогическое сопровождение одарённых детей // Успехи современного естествознания. — 2004. — № 5. — С. 55–58.
16. Усова А. В., Бобров А. А. Формирование учебных умений и навыков учащихся на уроках физики. — Москва : Просвещение, 1988. — 111 с.
17. Балаш В. А. Задачи по физике и методы их решения. — Москва : Просвещение, 1983. — 434 с.
18. Кокин В. А. Система задач по физике // Вестник Поволжской государственной социально-гуманитарной академии. — 2012. — № 7. — С. 272–278.
19. Лазарев А. Н., Кузько А. Е., Дремов Е. Н. Компьютерная интерактивная система решения задач по физике // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Лингвистика и педагогика. — 2013. — № 1. — С. 114–121.
20. Бордовская Н. В. Педагогика. — СПб. : Питер, 2000. — 401 с.
21. Латынина Д. Н. История педагогики. Воспитание и образование в России. — Москва : Издательский дом «Форум», 2008. — 315 с.
22. Сластенин В. А. Педагогика. — Москва : Школа-Пресс, 2009. — 512 с.
23. Харламов И. Ф. Педагогика. — Москва : Высшая школа, 2000. — 356 с.

**Сведения об авторах:**

**Татьяна Валерьевна Галоватюк** — учитель физики и математики МБОУ г. Ульяновска «Средняя школы № 85», 432066, Ульяновск, Россия.

E-mail: nazarowa.tanja@yandex.ru

ORCID iD  0000-0003-4222-067X

Web of Science ResearcherID  AAZ-8100-2020

# Pedagogical design of the system of Olympiad problems in electrodynamics at school

T. V. Galovatyuk 

MBOU Ulyanovsk "Secondary School No. 85", 432066 Ulyanovsk, Russia,

Submitted April 28, 2021

Resubmitted May 11, 2021

Published June 12, 2021

---

**Abstract.** The process of pedagogical design of the system of Olympiad problems in electrodynamics at school is considered. In the process of performing the work, a system of tasks and assignments in electrodynamics was introduced to prepare students of the eleventh grade of a general education school for physics olympiads. The analysis of problems of the Olympiad type in electrodynamics was carried out. In the course of the work, a pedagogical experiment was carried out, which showed the effectiveness of the system for preparing students for Olympiads in physics. As a result of the pedagogical experiment, it was shown that the developed system of olympiad problems in electrodynamics allows for effective preparation for solving problems in physics of the olympiad type.

**Keywords:** physics, physical education, problems in physics, student training system, physics problem system, pedagogical experiment

PACS: 01.40.-d

---

## References

1. Kamenetsky S. E., Orekhov V. P. Methodology for solving problems in physics in high school. Teacher's Guide. — Moscow : Education, 1971. — 448 p.
2. Kamenetsky S. E., Solodukhin N. A. Models and Analogies in High School Course: A Manual for Teachers. — Moscow : Education, 1982. — 96 p.
3. Orekhov V. P., Usova A. V. Methods of teaching physics in grades 8-10 of secondary school. Part 2. — Moscow : Education, 1980. — 350 p.
4. Reznikov L. I., Shamash S. Ya., Evenchik E. E. Methods of teaching physics in high school: mechanics: a manual for teachers. — Moscow : Education, 1974. — 238 p.
5. Shapovalov A. A. Reflections when solving physics problems. — Barnaul : BSPU Publishing House, 2001. — 150 p.
6. Razumovsky V. G., Braverman E. M. A physics lesson in a modern school (creative search for a teacher). — Moscow : Education, 1993. — 288 p.
7. Elizarov K. N. Questions of methods of teaching physics in secondary school: a guide for teachers. — Moscow, publisher = Uchpedgiz, year = 1962, numpages = 240, language = english.
8. Abrosimov B. F. Methods and methods of finding solutions to problems: teaching aid. — Moscow : Exam, 2006. — 287 p.

9. Degtyarev S. N. Creative Methods and Heuristic Techniques for Solving Physics Problems. — Tyumen : TOGIRRO, 2009. — 28 p.
10. Krasin M. S. Solution of complex and non-standard problems in physics. Heuristic techniques for finding solutions. — Moscow : ILEXA, 2008. — 360 p.
11. Krasin M. S. System of heuristic methods for solving problems in physics. Theory, methodology, examples: study guide. — Kaluga : Kaluga State University named after K. E. Tsiolkovsky, 2009. — 147 p.
12. Ilyasov I. I. A system of heuristic methods for solving problems. — Moscow : Publishing House of the Russian Open University, 1992. — 138 p.
13. Kozyreva N. A. Pedagogical support for gifted children // Achievements of modern natural science. — 2004. — no. 5. — P. 55–58.
14. Bordovskaya N. V. Pedagogy. — Saint Petersburg : Peter, 2000. — 401 p.
15. Latynina D. N. History of Pedagogy. Upbringing and education in Russia. — Moscow : Publishing house “Forum”, 2008. — 315 p.
16. Slastenin V. A. Pedagogy. — Moscow : School-Press, 2009. — 512 p.
17. Kharlamov I. F. Pedagogy. — Moscow : High School, 2000. — 356 p.
18. Balash V. A. Problems in physics and methods of solving them. — Moscow : Education, 1983. — 434 p.
19. Kokin V. A. System of problems in physics // Bulletin of the Volga State Social and Humanitarian Academy. — 2012. — no. 7. — P. 272–278.
20. Lazarev A. N., Kuzko A. E., Dremov E. N. Computer interactive system for solving problems in physics // Bulletin of the Southwestern State University. Series: Linguistics and Pedagogy. — 2013. — no. 1. — P. 114–121.
21. Usova A. V., Bobrov A. A. Formation of educational abilities and skills of students in physics lessons. — Moscow : Education, 1988. — 111 p.
22. Altunin K. K., Lushnikova Yu. O., Nazarova T. V. Electronic course on Olympiad problems in physics // In the proceedings: Topical issues of teaching technical disciplines. Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference. — 2018. — P. 6–8.
23. Altunin K. K., Lushnikova Yu. O., Nazarova T. V. Electronic course on Olympiad problems in physics // Science online: electronic scientific journal. — 2018. — no. 2 (3). — P. 53–69.

**Information about authors:**

**Tatiana Valerievna Galovatyuk** — teacher of physics and mathematics at MBOU Ulyanovsk “Secondary School No. 85”, 432066, Ulyanovsk, Russia.

E-mail: nazarowa.tanja@yandex.ru

ORCID iD  0000-0003-4222-067X

Web of Science ResearcherID  AAZ-8100-2020

## Секция 2

---

### Физико-математические науки

---

УДК 535.3  
ББК 22.343  
ГРНТИ 29.31.21  
ВАК 01.04.05

#### Исследование оптических свойств композитного метаматериала с матрицей из материала с отрицательным показателем преломления

К. К. Алтунин , И. А. Шарнина  <sup>1</sup>

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», 432071, Ульяновск, Россия*

Поступила в редакцию 18 января 2021 года  
После переработки 16 февраля 2021 года  
Опубликована 12 июня 2021 года

---

**Аннотация.** Рассмотрены оптические свойства нанокompозитного материала с матрицей из метаматериала с отрицательным показателем преломления. Проведены численные расчёты энергетических коэффициентов оптического пропускания и отражения от длины волны оптического излучения. Построены графики зависимости энергетических коэффициентов оптического пропускания и отражения от длины волны оптического излучения для различных параметров композитных метаматериалов. Показано, что можно эффективно управлять оптическим пропусканием нанокompозитного материала путём изменения параметров включений и матрицы нанокompозитного материала. Показано, что нанокompозитные плёнки из метаматериалов, состоящие из матрицы в виде метаматериала с отрицательным показателем преломления и системы наноразмерных включений из металлических наночастиц, обладают повышенным оптическим пропусканием через границу раздела с плёнкой из метаматериала.

**Ключевые слова:** нанокompозит, метаматериал, композитная среда, оптические излучение, оптическое пропускание, оптическое отражение, показатель преломления, уравнения Максвелла, оптоэлектронный прибор

PACS: 42.25.Bs

---

<sup>1</sup>E-mail: inna\_sharnina27@mail.ru

## Введение

В последнее время появились принципиально новые классы метаматериалов, которые обладают специфическими свойствами, в частности особыми электрическими характеристиками: антистатическими, электропроводящими, радиопоглощающими, электретными, пьезоэлектрическими и пироэлектрическими. Поэтому в настоящее время разработка метаматериалов и оптоэлектронных приборов на основе метаматериалов является одним из важнейших направлений в оптоэлектронной технике и материаловедении.

Целью работы является исследование оптических свойств нанокompозитной плёнки из метаматериала, содержащей металлические наночастицы и обладающей отрицательными значениями эффективного показателя преломления.

Задачи исследования:

1. написание обзора литературы по оптическим свойствам сред из метаматериалов;
2. создание теоретической модели для описания оптических процессов в метаматериалах с отрицательным эффективным показателем преломления, находящихся во внешнем поле оптического излучения;
3. проведение численных расчётов оптических характеристик нанокompозитных плёнок из метаматериала с отрицательным значением эффективного показателя преломления.

Объектом исследования является совокупность оптических явлений в метаматериалах, которые обладают отрицательными значениями эффективного показателя преломления в оптическом диапазоне длин волн излучения. Предметом исследования является нанокompозитная плёнка из метаматериала, обладающего отрицательным значением эффективного показателя преломления, находящаяся в поле оптического излучения. В качестве методов исследования используются методы классической и квантовой оптики для проведения теоретических вычислений, а также численные методы расчёта оптических характеристик полубесконечных, плёночных и слоистых сред или структур из оптических материалов и метаматериалов.

Гипотеза исследования состоит в том, что если провести исследование оптических свойств нанокompозитных плёнок из метаматериала, то можно разработать оригинальные материалы для проектирования новых наноразмерных оптоэлектронных приборов.

## Обзор литературы по оптическим свойствам метаматериалов

Недавно предложенные искусственные среды с отрицательной магнитной проницаемостью и левосторонние метаматериалы вновь рассматриваются в свете теории искусственных бианизотропных сред. Выделены некоторые необъяснимые свойства распространения электромагнитных волн в этих средах. Эти особенности правильно объясняются, если бианизотропия левостороннего метаматериала учтена в явном виде. Бианизотропия связана с существованием магнитоэлектрической связи в искусственных составляющих (искусственных атомах) среды. Существование бианизотропных эффектов в этих материалах с использованием приближённой модели исследовано в работе [1].

В статье [2] развивается электромагнитная теория, описывающая природу параметрической локализации оптического излучения, которая проявляется в метаматериалах

или фотонных кристаллах соответствующего дизайна, демонстрирующих нелинейное левостороннее поведение.

В статье [3] предсказано, что два электронных пучка могут развить нестабильность при прохождении через пластину из левосторонних сред. Эта нестабильность, присутствующая только левосторонним средам, возникает из-за обратного черенковского излучения и приводит к автомодуляции пучков и излучению электромагнитных волн. Эти волны покидают образец через заднюю поверхность пластины (плоскость инъекции луча) и образуют два смещенных ярких круга с центром в лучах. Моделируемый спектр излучения имеет хорошо разделённые линии сверху широкого непрерывного спектра, что указывает на динамический хаос в системе. Интенсивность излучения и его спектр могут контролироваться либо током пучка, либо расстоянием между двумя пучками.

В статье [4] импульс электромагнитной волны получается для среды Лоренца и применяется для изучения передачи импульса стационарным, изотропным левосторонним материалам. Модель включает дисперсию материала и потери, которые необходимы для среды с отрицательным показателем преломления. Результаты обеспечивают строгое доказательство силы на свободные токи в среде с потерями и подтверждение теоретического разделения силы на основе действительной и мнимой частей диэлектрической проницаемости и магнитной проницаемости. Полученная теорема сохранения импульса электромагнитной волны доказывает, что поток импульса монохроматической волны в изотропном левостороннем материале противоположен направлению потока энергии электромагнитной волны. Однако плотность импульса электромагнитной волны в среде с потерями и с отрицательным показателем преломления может быть параллельной или антипараллельной потоку мощности энергии электромагнитной волны. Полученные результаты применяются для прогнозирования изменения давления излучения на свободные токи в материале с отрицательным показателем преломления. Кроме того, сохранение импульса на границе материала означает, что тангенциальная составляющая импульса электромагнитной волны сохраняется. Таким образом, на границе между изотропными средами электромагнитная сила сдвига отсутствует, независимо от знака показателя преломления.

В работе [5] рассматривается существование и свойства гибридных поверхностных волн, образующихся на границах раздела между левосторонними материалами и диэлектрическими двулучепреломляющими средами. Установлено, что условия существования таких волн сильно ослаблены по сравнению с волнами Дьяконова, существующими в правосторонних средах. Левосторонние материалы вызывают сосуществование нескольких поверхностных решений, которые характеризуются повышенной степенью локализации. Примечательно, что гибридные поверхностные моды появляются для больших областей в пространстве параметров, что является ключевым свойством с точки зрения их экспериментального наблюдения.

В работе [6] показано, что поверхностные электромагнитные волны, распространяющиеся вдоль двумерных границ раздела, разделяющих разные метаматериалы, могут вести себя аналогично трёхмерным электромагнитным волнам в обычных или левосторонних средах, в зависимости от проницаемости или диэлектрической проницаемости двух материалов, образующих границу раздела сред. Получены условия, когда поверхностные электромагнитные волны, распространяющиеся вдоль двумерных границ раздела, переносят энергию, противоположную фазовой скорости. По аналогии с трёхмерными левосторонними средами получено, как аномальное черенковское излучение, так и обратный эффект Доплера. Отрицательное преломление на границе раздела между двумя различными границами раздела сред может быть полезно для идеального двумерного линзирования.

В работе [7] изучена кольцевая полость, заполненная пластиной из правого матери-

ала и пластиной из левого материала. Предполагается, что оба слоя являются нелинейными керровскими средами. Сначала выведена модель распространения света в левостороннем материале. Построив модель действующего поля, показано, что знак дифракции можно сделать положительным или отрицательным в этом резонаторе, в зависимости от толщины слоёв. Динамическое поведение модуляционной неустойчивости сильно зависит от знака коэффициента дифракции. При изучении диссипативных структур в этом резонаторе выявлено преобладание двумерного процесса повышающего переключение над образованием пространственно-периодических структур, приводящих к усечению однородного цикла гистерезиса.

В статье [8] показано, что в плоском волноводе, возбуждаемом линейным источником, можно управлять бесконечными модами, генерировать и передавать бесконечную плотность мощности, если волновод заполнен двухслойной средой одинаковой толщины, в которой одна из сред представляет собой воздух, а другая из сред является левосторонней средой. Чрезвычайно высокая плотность мощности может генерироваться и передаваться, когда плоский волновод, возбуждаемый линейным источником, содержит небольшие потери, и высокая мощность всё ещё может быть достигнута, даже если существуют относительно большие задержки и потери.

Одноосно анизотропные киральные среды довольно легко реализовать искусственно, где киральность проявляется только в одном направлении. В работе [9] исследованы преломляющие свойства плоской волны, падающей из свободного пространства в такие одноосно киральные среды. Разные отрицательные фазовые или групповые скорости преломления происходят в одной или двух собственных волнах одновременно или по отдельности. Следовательно, одноосно-киральные среды могут поддерживать больше видов отрицательных преломлений, чем изотропные киральные среды и левосторонние материалы. В одноосном киральном предложении условие реализации отрицательного преломления может быть довольно свободным.

Отрицательная рефракция — это явление, о котором недавно сообщалось в случае левосторонних сред (изотропных или нет), фотонных кристаллов и вращающихся одноосных сред. В работе [10] идентифицировано другое происхождение отрицательного преломления из-за движения передаваемой среды параллельно границе раздела, на котором происходит преломление. Предыдущие работы в этой области были сосредоточены на скоростях среды, которые превышают черенковский предел, в то время как здесь показано, что отрицательное преломление фактически достижимо при любых скоростях проходящей среды.

Из уравнений Максвелла и теоремы Пойнтинга, плотности электрической и магнитной энергии во временной области обычно определяются в частотно-дисперсионных средах на основе сохранения энергии. Как следствие, предлагается общее определение электрической и магнитной энергии. По сравнению с существующими формулами электрической и магнитной энергии в частотно-дисперсионных средах, новое определение более разумно и действительно в любом случае. В работе [11] показано, что сохранение энергии не нарушается в левосторонних средах.

В статье [12] представлена схема квантования электромагнитного поля, взаимодействующего с атомными системами в присутствии рассеивающих и поглощающих магнитодиэлектрических сред, в том числе левостороннего материала, имеющего отрицательную вещественную часть показателя преломления. Теория применяется к спонтанному распаду двухуровневого атома в центре сферической полости в свободном пространстве, окруженной магнитодиэлектрическим веществом перекрывающихся энергетических зон. Представлены результаты для больших и малых полостей, а также проблема локальных полевых поправок в модели реальной полости.

В работе [13] изучена передача на границе раздела между правосторонней средой и

частотно-дисперсионной левосторонней средой. Чтобы учесть дисперсию, рассматриваются два типа спектров сигнала. Первая состоит из двух дискретных частот, а вторая является гауссовой. Получены явные выражения для полей временной области, из которых рассчитываются усредненные по времени векторы Пойнтинга и, следовательно, векторы потока мощности. В обоих случаях волны преломляются под отрицательными углами на границе раздела между правосторонней средой и частотно-дисперсионной левосторонней средой.

На микроволновых частотах полые металлические волноводы ведут себя в определенных аспектах как «одномерная плазма». Эта функция будет выгодно использоваться для моделирования распространения электромагнитных волн в левосторонних метаматериалах при условии, что полый волновод периодически нагружается расщеплёнными кольцевыми резонаторами. В работе [14] показано, что электромагнитная передача в этой структуре возможна в определенной полосе частот, даже если поперечные размеры волновода намного меньше, чем соответствующая длина волны в свободном пространстве. Этот эффект может быть качественно и количественно объяснен теорией левого метаматериала, таким образом обеспечивая новую экспериментальную проверку такой теории.

В статье [15] исследованы особенности распространения электромагнитных волн в одноосно-анизотропных левосторонних средах. Обсуждается, при каких условиях аномальное отражение или преломление должно происходить на границе раздела, когда распространяющиеся волны переходят из одной изотропной регулярной среды в другую одноосно-анизотропную левостороннюю среду, и при каких условиях происходит аномальная передача, когда мимолётная волна передается через пластину одноосная анизотропная левосторонняя среда. Показано, что характеристики распространения электромагнитных волн в одноосно-анизотропных левосторонних средах существенно отличаются от характеристик в изотропных левосторонних средах.

Метаматериалы как искусственные среды с субволновыми элементарными ячейками предлагают многообещающие подходы для передачи электромагнитных волн. Идеальная суперлинза в виде пластины с отрицательным показателем преломления может создать идеальное изображение [16]. Гиперлинза, созданная из материала с неопределённым тензором диэлектрической проницаемости (так называемый гиперболический метаматериал [17, 18]), позволяет превзойти дифракционный предел [19].

Недавно было показано, что конструкции пассивных линз могут сохранять идеальное линзирование, несмотря на собственные потери в составе левых материалов. В работе [20] показано, что сохранение энергии не противоречит работе таких идеальных линз с потерями: необратимая передача электромагнитной энергии материалу с потерями диктует, что меньшая часть энергии, излучаемой источником, поступает на изображение, но точность изображения абсолютно сохраняется. Кроме того, мощность изображения, которая действительно достигает идеального изображения, должна уменьшаться вдали от системы. Показано, что это применимо к любой многослойной идеальной линзе на основе левого носителя, включая хорошо известную линзу Веселаго. Для объектива Максвелла с «рыбьим глазом» расход энергии универсален для всех идеальных объективов и присущ любому идеальному изображению. Поэтому правильное рассмотрение этой уникальной динамики силы имеет важное значение для любой успешной практической реализации идеальных линз из существующих метаматериалов.

В работе [21] осуществлена локализация электромагнитных волн и энергий, используя левую линию передачи суперлинзы. Подробно описана процедура создания сред для правой и левой линий электропередачи, которые соответствуют вакууму и слегка несовпадающему антивакууму соответственно. После надлежащего проектирования и правильного согласования с нагрузками на клеммах рассмотрен результат создания

суперлинзы, использующей левую линию передачи. С помощью моделирования СВЧ-цепей с использованием усовершенствованной системы проектирования показано, что почти все электромагнитные поля и энергии ограничены в области между двумя источниками напряжения с одинаковой амплитудой и антифазами, когда они размещены на изображении точки суперлинзы. В результате моделирования чётко наблюдаются сильные поверхностные волны, что согласуется с теоретическим анализом суперлинзы из однородного левого материала с небольшими потерями. Здесь небольшие потери вызваны пространственной дисперсией сетей линий электропередачи. Различные несоответствия антивакуума для левых сред приводят к разным характеристикам суперлинзы, которые определяются параметрами схемы.

Проведённый анализ научной литературы показывает актуальность исследования метаматериалов и нанокompозитов на основе метаматериалов.

## Теоретическая модель и результаты

Метаматериалы — это композитные среды, состоящие из субволновых структур в виде метамолекул. Эти искусственные структуры популярны благодаря своим неестественным свойствам, таким как отрицательный показатель преломления, сильная локализация поля, маскировка, сильный магнитный отклик, суперлинзинговый эффект и другие. Метаматериалы имеют высокий технологический спрос, так как их электромагнитные свойства легко настраиваются путём изменения геометрических размеров и форм.

Оптические свойства плёнки из метаматериала сильно зависят от весового содержания наноразмерных включений в матрице. Необходимо определить оптимальное содержание наноразмерных включений, при котором достигаются наилучшие показатели в минимальном отражении и максимальном пропускании оптического излучения. Рассматриваемая проблема имеет отношение к поиску абсолютно прозрачного нанокompозита.

Согласно теории теории гомогенизации, анизотропная среда, состоящая из матрицы метаматериала и системы нановключений, может быть представлена как сплошная среда, обладающая эффективным показателем преломления.

Эффективный комплексный показатель преломления плёнки из метаматериала, состоящего из матрицы метаматериала с показателем преломления  $n_m$  и наноразмерных включений с показателем преломления  $n_p$  может быть найден по следующей формуле [22, 23]:

$$n_{eff} = f_1 n_p + (1 - f_1) n_m . \quad (1)$$

Весовое содержание наноразмерных включений в плёнке из метаматериала определим по следующей формуле:

$$f_1 = \frac{\rho_A q_1}{\rho_A q_1 + \rho_m q_1} , \quad (2)$$

где  $\rho_A, \rho_m$  — плотности массивных материалов нановключений и матрицы соответственно,  $f_1 = N'_0 \frac{4\pi}{3} a^3$ ,  $a$  — радиус нановключений,  $N'_0 = 1/(R_x R_y R_z)$  — средняя концентрация нановключений в плёнке из метаматериала,  $R_\gamma = 2a + \Delta_\gamma$ ,  $\Delta_\gamma$  — среднее расстояние между поверхностями соседних нановключений,  $\gamma = x, y, z$ .

Обозначим через  $E_0^s$  и  $R^s$  амплитуды падающей и отражённой волн в среде 1 для случая  $s$ -поляризованной внешней электромагнитной волны. Электромагнитное поле в плёнке из метаматериала складывается из преломлённой оптической волны на границе сред 1 и 2 (амплитуда  $E_1^s$ ) и оптической волны, отражённой от границы 2-3 (амплитуда  $E_2^s$ ). Граничные условия на границах раздела сред, находящихся на поверхностях

плёнки из метаматериала, дают следующие уравнения [24]:

$$E_1^s = t_{12}^\perp E_0^s + r_{21}^s E_2^s, \quad (3)$$

$$R_1^s = r_{12}^s E_0^s + t_{21}^s E_2^s, \quad (4)$$

$$T_1^s = t_{23}^\perp E_1^s \exp\{i\phi_1\}, \quad (5)$$

$$T_1^s r_{23}^s = t_{23}^s E_2^s \exp(-i\phi_1), \quad (6)$$

где  $T_1^s$  — амплитуда электромагнитной волны, прошедшей в подстилающую среду 3,

$$t_{ik}^s = \frac{2(n_i + i\kappa_i) \cos \theta_i}{(n_i + i\kappa_i) \cos \theta_i + (n_k + i\kappa_k) \cos \theta_k}, \quad (7)$$

$$r_{ik}^s = \frac{(n_i + i\kappa_i) \cos \theta_i - (n_k + i\kappa_k) \cos \theta_k}{(n_i + i\kappa_i) \cos \theta_i + (n_k + i\kappa_k) \cos \theta_k} \quad (8)$$

амплитудные френелевские коэффициенты для оптического прохождения и оптического отражения, соответствующие  $s$ -поляризованным электромагнитным волнам,  $i, k$  — индексы, нумерующие среду. Так, в среде 1 имеем  $\theta_1$  — угол падения внешней электромагнитной волны, в среде 2  $\theta_2$  — угол преломления,  $\theta_3$  — угол преломления в среде 3,  $n_1 = 1, \kappa_1 = 0, n_2 + i\kappa_2$  — комплексный показатель преломления плёнки из метаматериала с нановключениями,  $n_3 + i\kappa_3$  — показатель преломления подстилающей среды. В рассматриваемом приближении можно считать подстилающую среду полубесконечной средой по сравнению с толщиной плёнки из метаматериала. Из уравнений (5) и (6) имеем соотношение

$$E_2^s = r_{23}^s \exp(2i\phi_1) E_1^s. \quad (9)$$

Угол  $\theta_2$  в плёнке из метаматериала определим из обобщённого закона преломления оптического излучения [24]:

$$\sin \theta_2 = \frac{\sin \theta_1}{n_2 + i\kappa_2}. \quad (10)$$

Экспоненциальные множители в выражениях (5)–(6) учитывают изменение фазы и амплитуды волн на толщине плёнки из метаматериала  $d_2$ , причём для фазового множителя, который стоит в показателе экспоненты, выполняется следующее соотношение:

$$\phi_1 = k_0 d_2 \sqrt{(n_2 + i\kappa_2)^2 - \sin^2 \theta_1}. \quad (11)$$

Из уравнений (3), (6) определим напряжённость электрического поля внутри плёнки из метаматериала вблизи границы раздела 1-2 [24]:

$$E_1^s = E_0^s \frac{t_{12}^s}{1 + r_{12}^s r_{23}^s \exp(2i\phi_1)}, \quad (12)$$

а также напряжённость электрического поля внутри плёнки из метаматериала вблизи границы раздела сред 2 и 3

$$E_2^s = E_0^s \frac{t_{12}^s r_{23}^s \exp(2i\phi_1)}{1 + r_{12}^s r_{23}^s \exp(2i\phi_1)}. \quad (13)$$

Из уравнения (4) определим амплитуду отражённой оптической волны от плёнки из метаматериала:

$$R_1^s = E_0^s \frac{r_{12}^s + r_{23}^s \exp(2i\phi_1)}{1 + r_{12}^s r_{23}^s \exp(2i\phi_1)}. \quad (14)$$

Теперь можно найти амплитуду прошедшей электромагнитной волны в подстилающую среду из следующего выражения [24]:

$$T_1^s = E_0^s \frac{t_{12}^s t_{23}^s \exp(i\phi_1)}{1 + r_{12}^s r_{23}^s \exp(2i\phi_1)} . \quad (15)$$

Формулы (12)–(15) решают поставленную граничную задачу оптики плёнок из метаматериала. Аналогичным образом могут быть определены и амплитуды  $p$ -поляризованных волн.

Рассмотрим вывод дисперсионного соотношения в однородном изотропном метаматериале, находящимся во внешнем поле оптического излучения. Существует несколько способов моделирования распространения электромагнитной волны в некоторой среде. Самым общим способом описания этого распространения является система уравнений Максвелла, из которой можно получить векторные волновые уравнения для определения электрической и магнитной компонент поля.

Рассмотрим однородную структуру метаматериала. Запишем уравнения Максвелла для однородного изотропного метаматериала в виде

$$\begin{aligned} \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{1}{c} \mu_j \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} , \\ \nabla \cdot (\varepsilon_j \mathbf{E}) &= 0 , \\ \nabla \times \mathbf{H} &= \frac{1}{c} \varepsilon_j \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} , \\ \nabla \cdot (\mu_j \mathbf{H}) &= 0 . \end{aligned} \quad (16)$$

Индекс  $j$  принимает значение  $n$  для нанокompозита или значение  $d$  для диэлектрика.

Диэлектрическую проницаемость для металлических наноразмерных включений можно описать в рамках модели Друде-Лоренца. Она будет иметь следующий вид:

$$\varepsilon_p = \varepsilon_0 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega(\gamma_0 + Av_F/a)} , \quad (17)$$

где  $\varepsilon_0$  – постоянный вклад, учитывающий межзонные переходы связанных электронов,  $\omega_p$  – плазменная частота,  $\gamma_0$  – параметр релаксации в неограниченном объеме металла. Формула Максвелл-Гарнетта имеет вид:

$$\frac{\varepsilon_{\text{eff}} - \varepsilon_m}{\varepsilon_{\text{eff}} + 2\varepsilon_m} = f \frac{\varepsilon_p - \varepsilon_m}{\varepsilon_{\text{eff}} + 2\varepsilon_m} . \quad (18)$$

Предполагая, что и диэлектрик и нанокompозит являются однородными и изотропными, подставим в уравнение Максвелла решение в виде плоских волн:

$$(\mathbf{E}, \mathbf{H}) \propto A(z) e^{i(\omega t - \beta x)} . \quad (19)$$

После подстановки (19) возникают уравнения Гельмгольца для каждой из сред. Система уравнений разделяется на две независимые подсистемы собственных волн:  $(E_x, H_y, E_z)$  и  $(H_x, E_y, H_z)$ . Первая подсистема соответствует ТМ-волне, вторая – ТЕ-волне. Запишем уравнения для полей ТМ-волны:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 H_y}{dz^2} - q_j^2 H_y &= 0 , \\ \frac{dH_y}{dz} &= -ik_0 \varepsilon_j E_x , \\ \beta H_y &= -k_0 \varepsilon_j E_z . \end{aligned} \quad (20)$$

где  $\omega$  – частота, изучаемой волны,  $\beta$  – продольная константа распространения. Уравнения второй подсистемы выглядят аналогично. Для поперечных компонент константы распространения в диэлектрике и нанокompозите вводятся следующие обозначения:

$$q_d^2 = \beta^2 - k_0^2 \varepsilon_d \mu_d, \quad (21)$$

$$q_n^2 = \beta^2 - k_0^2 \varepsilon_{\text{eff}} \mu_n, \quad (22)$$

где  $k_0 = \omega/c$ ,  $c$  – скорость света в вакууме,  $\varepsilon_d$  – диэлектрическая проницаемость материала подложки,  $\varepsilon_{\text{eff}}$  – эффективная диэлектрическая проницаемость однородного нанокompозита;  $\mu_d$  – магнитная проницаемость диэлектрика подложки,  $\mu_n$  – магнитная проницаемость нанокompозита.

Для получения дисперсионного соотношения необходимо использовать равенство тангенциальных компонент электрического и магнитного полей. Амплитуды всех полей должны затухать в направлении при удалении от  $z = 0$ , поскольку источников излучения нет ни внутри диэлектрика, ни внутри нанокompозитной среды. Решения в диэлектрике и нанокompозите примут следующий вид:

$$\begin{aligned} (\mathbf{E}, \mathbf{H})_d &\propto A e^{-q_d z} e^{i(\omega t - \beta x)}, \quad z > 0, \\ (\mathbf{E}, \mathbf{H})_n &\propto A e^{q_n z} e^{i(\omega t - \beta x)}, \quad z < 0. \end{aligned} \quad (23)$$

Граничное условие для волн ТЕ-типа запишется в виде:

$$\begin{cases} H_x^d = H_x^n, \\ E_y^d = E_y^n. \end{cases}, \quad (24)$$

Из соотношений (24) и (23) получается уравнение

$$\frac{q_n}{\mu_n} + \frac{q_d}{\mu_d} = 0. \quad (25)$$

Данное граничное условие не может быть удовлетворено, так как все величины в уравнении положительные. Из этого следует, что на поверхности диэлектрического нанокompозита волны ТЕ-типа не реализуется.

В дальнейшем нас будут интересовать только волны ТМ-типа. Для волн ТМ-типа граничное условие запишется аналогично:

$$\begin{cases} E_x^d = E_x^n, \\ H_y^d = H_y^n. \end{cases}, \quad (26)$$

Получаем соотношение, подобное (25):

$$\frac{q_n}{\varepsilon_{\text{eff}}} + \frac{q_d}{\varepsilon_d} = 0, \quad (27)$$

Пользуясь этим соотношением можно выразить величину продольной константы распространения через диэлектрическую и магнитную проницаемость обеих граничащих сред. Для этого нужно совместно решить систему уравнений из условия (27) и выражений (21). Следует отметить, что в оптическом диапазоне частот магнитные проницаемости материалов структур равны единице. Итого получаем следующее дисперсионное соотношение:

$$\beta^2 = k_0^2 \frac{\varepsilon_d \varepsilon_{\text{eff}} (\varepsilon_d \mu_n - \varepsilon_{\text{eff}} \mu_d)}{\varepsilon_d^2 - \varepsilon_{\text{eff}}^2} = k_0^2 \frac{\varepsilon_d \varepsilon_{\text{eff}}}{\varepsilon_d + \varepsilon_{\text{eff}}}. \quad (28)$$

Резонансный характер всех констант распространения целиком обеспечен частотной зависимостью эффективной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_{\text{eff}}$  нанокompозитной среды.

Конкретный вид  $\varepsilon_{\text{eff}}(z)$  не оговаривался ранее, поэтому следует ввести эту зависимость. Подставим (19) в формулу (16) и запишем величину эффективной диэлектрической проницаемости нанокompозитной среды  $\varepsilon_{\text{eff}}(z)$ :

$$\varepsilon_{\text{eff}}(z) = \varepsilon_m \left( 1 + \frac{3f_0 \exp(-z/z_0) (\varepsilon_p - \varepsilon_m)}{3\varepsilon_m + (1 - f_0 \exp(-z/z_0)) (\varepsilon_p - \varepsilon_m)} \right), \quad (29)$$

а также величину эффективной магнитной проницаемости нанокompозитной среды из метаматериала в виде:

$$\mu_{\text{eff}}(z) = \mu_m \left( 1 + \frac{3f_0 \exp(-z/z_0) (\mu_p - \mu_m)}{3\mu_m + (1 - f_0 \exp(-z/z_0)) (\mu_p - \mu_m)} \right), \quad (30)$$

где  $\mu_m$  – магнитная проницаемость материала матрицы нанокompозитной среды,  $\mu_p$  – магнитная проницаемость материала наноразмерных включений в нанокompозитную среду.

Поскольку получение дисперсионного соотношения без каких-либо дополнительных приближений вызвало определенные трудности, воспользуемся малостью объёмной доли наноразмерных включений ( $f_0 \ll 1$ ). Тогда зависимость от координаты  $z$  в знаменателе формулы (29) пропадет.

Эффективная диэлектрическая проницаемость нанокompозитной среды с наноразмерными включениями из метаматериала примет вид:

$$\varepsilon_{\text{eff}}(z) = \varepsilon_m \left( 1 + \frac{3f_0 (\varepsilon_p - \varepsilon_m)}{2\varepsilon_m + \varepsilon_p} \exp(-z/z_0) \right). \quad (31)$$

Эффективная магнитная проницаемость нанокompозитной среды с наноразмерными включениями из метаматериала примет вид:

$$\mu_{\text{eff}}(z) = \mu_m \left( 1 + \frac{3f_0 (\mu_p - \mu_m)}{2\mu_m + \mu_p} \exp(-z/z_0) \right). \quad (32)$$

Компоненты вектора Умова-Пойтинга в нанокompозитной среде приобретают более сложный вид из-за сложной координатной зависимости полей и эффективной диэлектрической проницаемости нанокompозитной среды:

$$S_x^n = \frac{S_0 |\varepsilon_{\text{eff}}(z)|}{k_0} \left| J_{2z_0 q_{n0}} \left( 2z_0 \psi e^{-\frac{z}{2z_0}} \right) \right|^2 \text{Re} \left( \frac{\beta}{\varepsilon_{\text{eff}}(z)} \right), \quad (33)$$

а  $z$ -компонента вектора Умова-Пойтинга принимает вид:

$$S_z^n = \frac{S_0 |\varepsilon_{\text{eff}}(z)|}{k_0} \left| J_{2z_0 q_{n0}} \left( 2z_0 \psi e^{-\frac{z}{2z_0}} \right) \right|^2 \times \text{Re} \left( \frac{i}{\varepsilon_{\text{eff}}(z)} \left( \left( \frac{1}{2\varepsilon_{\text{eff}}(z)} \frac{\partial \varepsilon_{\text{eff}}(z)}{\partial z} - q_{n0} \right) + \psi e^{-\frac{z}{2z_0}} F(z) \right) \right), \quad (34)$$

где введена величина  $F(z)$ , равная

$$F(z) = \frac{J_{2z_0 q_{n0} + 1} \left( 2z_0 \psi e^{-\frac{z}{2z_0}} \right)}{J_{2z_0 q_{n0}} \left( 2z_0 \psi e^{-\frac{z}{2z_0}} \right)}. \quad (35)$$

Отношение потоков электромагнитных волн в неоднородном нанокompозите и диэлектрике имеет тот же вид, что и в случае однородного нанокompозита. Отличие заключается в наличии дополнительного множителя, связанного с координатной зависимостью амплитуды поля в нанокompозите, отличного от экспоненциальной.

$$\frac{S_x^n}{S_x^d} = \left| \sqrt{\varepsilon_{\text{eff}}(z)} J_{2z_0 q_{n0}}(2z_0 \psi \exp(-z/2z_0)) \right|^2 \left( \frac{\varepsilon'_{\text{eff}}(z)}{\varepsilon_d} + \frac{\beta'' \varepsilon''_{\text{eff}}(z)}{\beta' \varepsilon_d} \right), \quad (36)$$

где  $\varepsilon'(z)$  – действительная часть эффективной диэлектрической проницаемости нанокompозитной среды с наноразмерными включениями из метаматериалов,  $\varepsilon''(z)$  – мнимая часть эффективной диэлектрической проницаемости нанокompозитной среды с наноразмерными включениями из метаматериалов в случае неоднородной нанокompозитной среды, вычисленные в оптическом приближении.

Приведём результаты численных расчётов коэффициентов оптического отражения и пропускания нанокompозитных сред из метаматериалов. Оптические свойства метаматериала определяются не столько структурной организацией, сколько характеристиками образующих его компонент. При этом его эффективные характеристики нанокompозита из метаматериала могут значительно отличаться как от характеристик металла (включений), так и диэлектрика матрицы нанокompозита, принимая совершенно уникальные значения, которые не встречаются среди природных материалов. Примером таких экзотических характеристик можно назвать показатель преломления, который способен изменяться в широких пределах в оптическом диапазоне. Эффективный показатель преломления нанокompозитной среды при этом может быть сверхбольшим, близким к единице или много меньше единицы. Весьма важными представляются также исследование физических процессов распространения света в неоднородной среде, примером которой могут являться многие нанокompозитные среды с наночастицами.

Нанокompозитные плёнки из метаматериалов с отрицательными значениями эффективного показателя преломления находятся во внешнем поле оптического излучения и могут располагаться на различных подложках.

Вычислим эффективный комплексный показатель преломления среды 1 из метаматериала 1. Для определения показателя преломления плёнки используем следующую формулу смешения

$$n_1 = f_1 n_1^p + (1 - f_1) n_1^m, \quad (37)$$

где  $f_1$  – фактор заполнения частицами плёнки среды 1.

Рассмотрим результаты численных расчётов энергетических коэффициентов оптического отражения и пропускания нанокompозитных сред из метаматериалов. На рис. 1 изображён график зависимости действительной части комплексного показателя преломления среды 1 из метаматериала 1 с фактором заполнения наночастицами серебра  $f_1 = 4\%$  от длины волны излучения. Показатель преломления матрицы плёнки равен  $n_1^m = -1.121 - i0.12$ .

На рис. 2 изображён график зависимости мнимой части комплексного показателя преломления среды 1 из метаматериала 1 с фактором заполнения наночастицами серебра  $f_1 = 4\%$  от длины волны излучения. Показатель преломления матрицы плёнки равен  $n_1^m = -1.121 - i0.12$ .

Рассмотрим результаты численных расчётов оптического отражения и пропускания нанокompозитной плёнки из метаматериала 1. На рис. 3 изображён график зависимости энергетического коэффициента отражения плёнки среды 1 толщиной  $d_1 = 120$  мкм из метаматериала 1 с фактором заполнения наночастицами серебра  $f_1 = 4\%$  от длины волны излучения. На вставке изображён энергетический коэффициент поглощения плёнки. Угол падения внешнего излучения  $\theta_0 = 3^\circ$ . Показатель преломления матрицы плёнки равен  $n_1^m = -1.121 - i0.12$ .

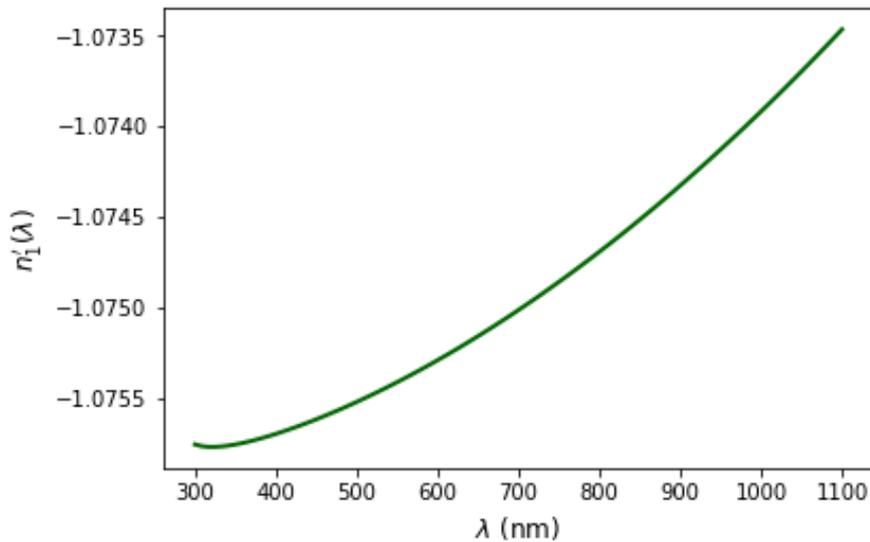


Рис. 1. Действительная часть комплексного показателя преломления среды 1 из метаматериала 1 с фактором заполнения наночастицами серебра  $f_1 = 4\%$  от длины волны излучения. Показатель преломления матрицы плёнки равен  $n_1^m = -1.121 - i0.12$ .

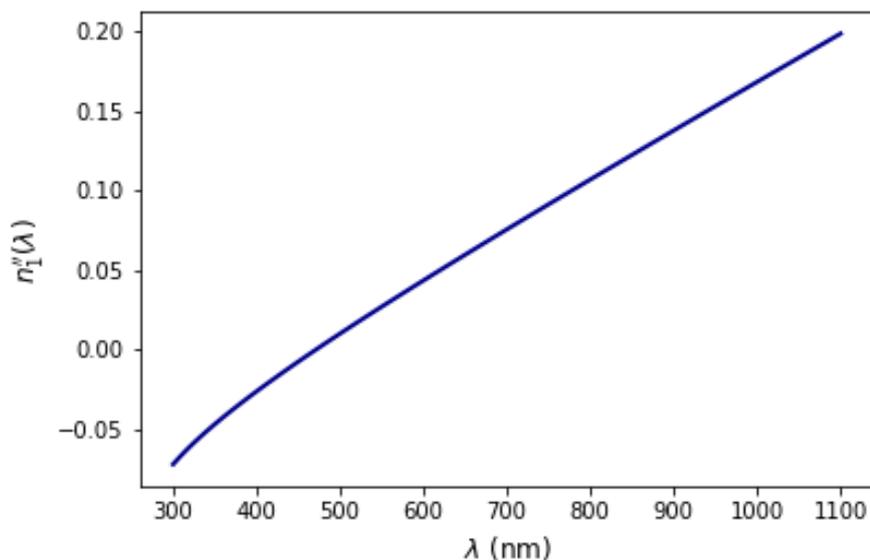


Рис. 2. Мнимая часть комплексного показателя преломления среды 1 из метаматериала 1 с фактором заполнения наночастицами серебра  $f_1 = 4\%$  от длины волны излучения. Показатель преломления матрицы плёнки равен  $n_1^m = -1.121 - i0.12$ .

На рис. 4 изображён график зависимости энергетического коэффициента пропускания плёнки среды 1 толщиной  $d_1 = 120$  мкм из метаматериала 1 с фактором заполнения наночастицами серебра  $f_1 = 4\%$  от длины волны излучения. Угол падения внешнего излучения  $\theta_0 = 3^\circ$ . Показатель преломления матрицы плёнки равен  $n_1^m = -1.121 - i0.12$ .

Вычислим комплексный показатель преломления среды 1 из метаматериала 2. На рис. 5 изображён график зависимости действительной части комплексного показателя преломления среды 1 из метаматериала 2 с фактором заполнения наночастицами серебра  $f_1 = 4\%$  от длины волны излучения. Показатель преломления матрицы плёнки равен  $n_1^m = -0.981 - i0.032$ .

На рис. 6 изображён график зависимости мнимой части комплексного показателя

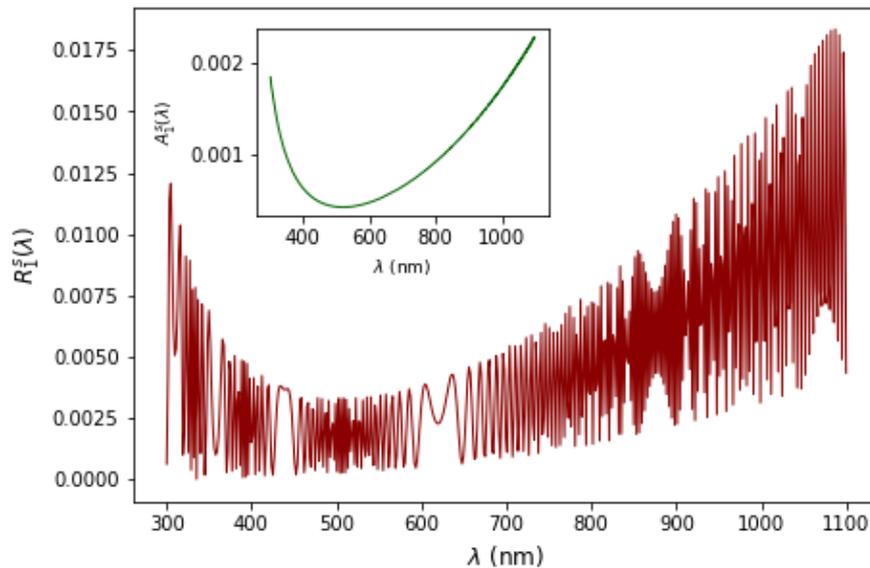


Рис. 3. Энергетический коэффициент отражения плёнки среды 1 толщиной  $d_1 = 120$  мкм из метаматериала 1 с фактором заполнения наночастицами серебра  $f_1 = 4\%$  от длины волны излучения. На вставке изображён энергетический коэффициент поглощения плёнки. Угол падения внешнего излучения  $\theta_0 = 3^\circ$ . Показатель преломления матрицы плёнки равен  $n_1^m = -1.121 - i0.12$ .

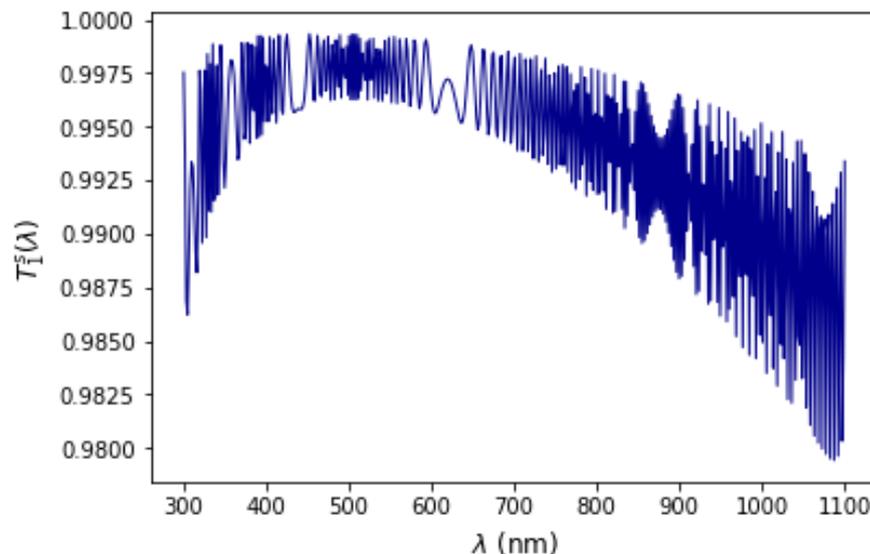


Рис. 4. Энергетический коэффициент пропускания плёнки среды 1 толщиной  $d_1 = 120$  мкм из метаматериала 1 с фактором заполнения наночастицами серебра  $f_1 = 4\%$  от длины волны излучения. Угол падения внешнего излучения  $\theta_0 = 3^\circ$ . Показатель преломления матрицы плёнки равен  $n_1^m = -1.121 - i0.12$ .

преломления среды 1 из метаматериала 2 с фактором заполнения наночастицами серебра  $f_1 = 4\%$  от длины волны излучения. Показатель преломления матрицы плёнки равен  $n_1^m = -0.981 - i0.032$ .

Рассмотрим оптическое отражение и пропускание плёнки из метаматериала 2. На рис. 7 изображён график зависимости энергетического коэффициента отражения плёнки среды 1 толщиной  $d_1 = 120$  мкм из метаматериала 2 с фактором заполнения наночастицами серебра  $f_1 = 4\%$  от длины волны излучения. На вставке изображён энергетический

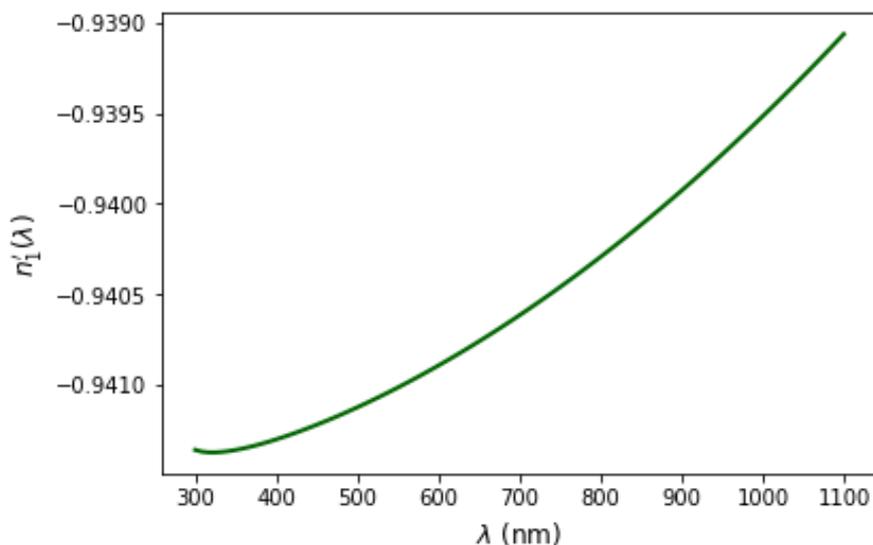


Рис. 5. Действительная часть комплексного показателя преломления среды 1 из метаматериала 2 с фактором заполнения наночастицами серебра  $f_1 = 4\%$  от длины волны излучения. Показатель преломления матрицы плёнки равен  $n_1^m = -0.981 - i0.032$ .

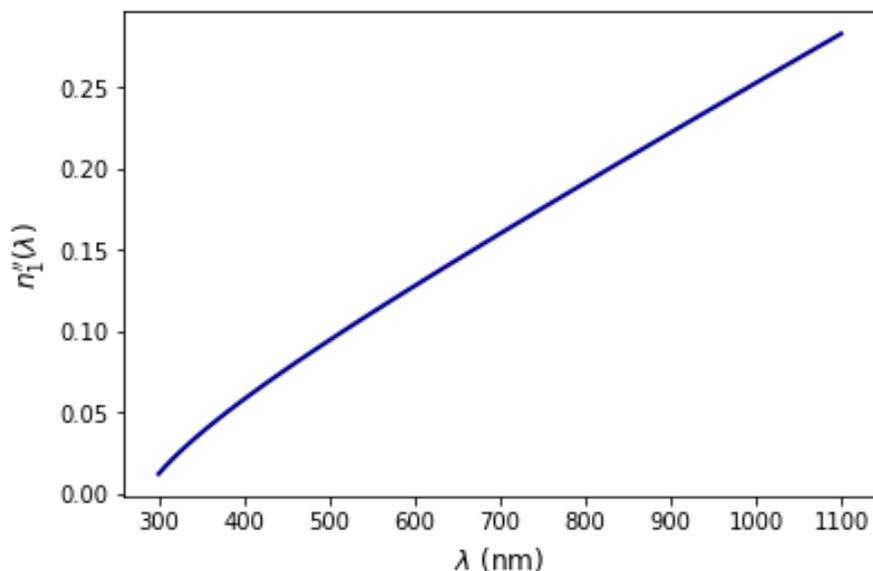


Рис. 6. Мнимая часть комплексного показателя преломления среды 1 из метаматериала 2 с фактором заполнения наночастицами серебра  $f_1 = 4\%$  от длины волны излучения. Показатель преломления матрицы плёнки равен  $n_1^m = -0.981 - i0.032$ .

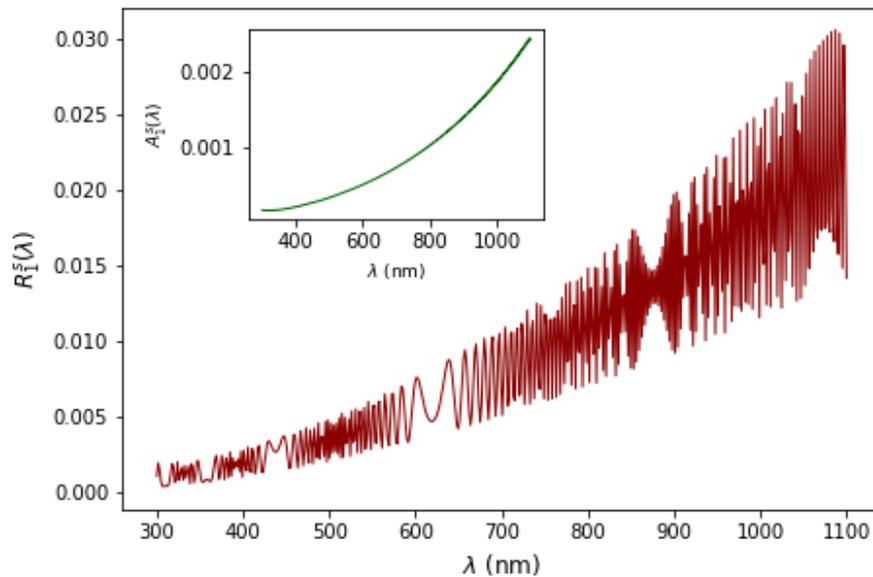


Рис. 7. Энергетический коэффициент отражения плёнки среды 1 толщиной  $d_1 = 120$  мкм из метаматериала 2 с фактором заполнения наночастицами серебра  $f_1 = 4\%$  от длины волны излучения. На вставке изображён энергетический коэффициент поглощения плёнки. Угол падения внешнего излучения  $\theta_0 = 3^\circ$ . Показатель преломления матрицы плёнки равен  $n_1^m = -0.981 - i0.032$ .

ческий коэффициент поглощения плёнки. Угол падения внешнего излучения  $\theta_0 = 3^\circ$ . Показатель преломления матрицы плёнки равен  $n_1^m = -0.981 - i0.032$ .

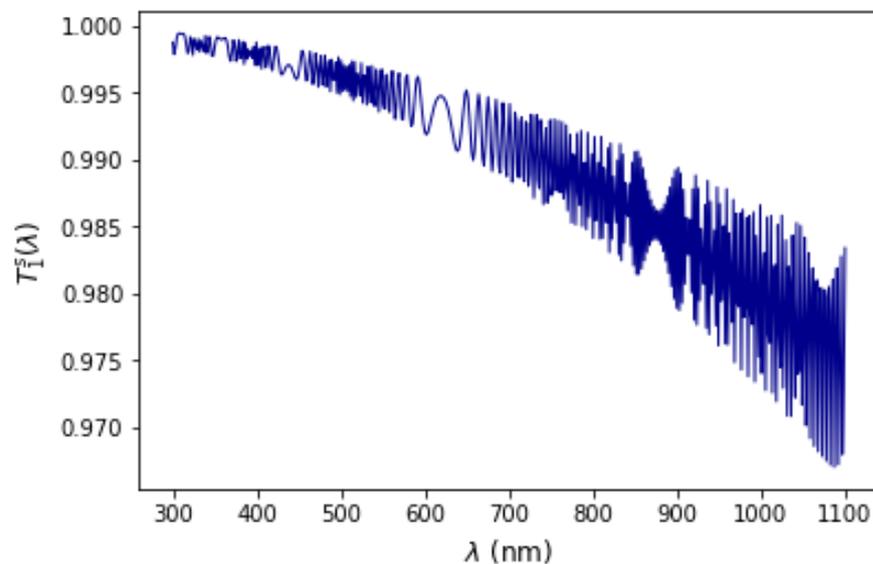


Рис. 8. Энергетический коэффициент пропускания плёнки среды 1 толщиной  $d_1 = 120$  мкм из метаматериала 2 с фактором заполнения наночастицами серебра  $f_1 = 4\%$  от длины волны излучения. Угол падения внешнего излучения  $\theta_0 = 3^\circ$ . Показатель преломления матрицы плёнки равен  $n_1^m = -0.981 - i0.032$ .

На рис. 8 изображён график зависимости энергетического коэффициента пропускания плёнки среды 1 толщиной  $d_1 = 120$  мкм из метаматериала 2 с фактором заполнения наночастицами серебра  $f_1 = 4\%$  от длины волны излучения. Угол падения внешнего излучения  $\theta_0 = 3^\circ$ . Показатель преломления матрицы плёнки равен  $n_1^m = -0.981 - i0.032$ .

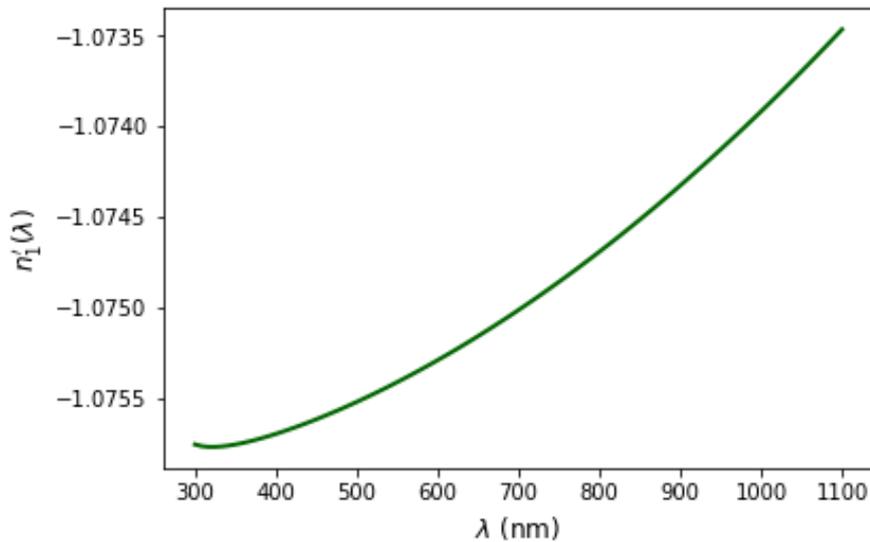


Рис. 9. Действительная часть комплексного показателя преломления среды 1 из метаматериала 3 с фактором заполнения наночастицами серебра  $f_1 = 4\%$  от длины волны излучения. Показатель преломления матрицы плёнки равен  $n_1^m = -1.121 + i0.032$ .

Вычислим эффективный комплексный показатель преломления нанокompозитной среды 1 с матрицей из метаматериала 3. На рис. 9 изображён график зависимости действительной части комплексного показателя преломления среды 1 из метаматериала 3 с фактором заполнения наночастицами серебра  $f_1 = 4\%$  от длины волны излучения. Показатель преломления матрицы плёнки равен  $n_1^m = -1.121 + i0.032$ .

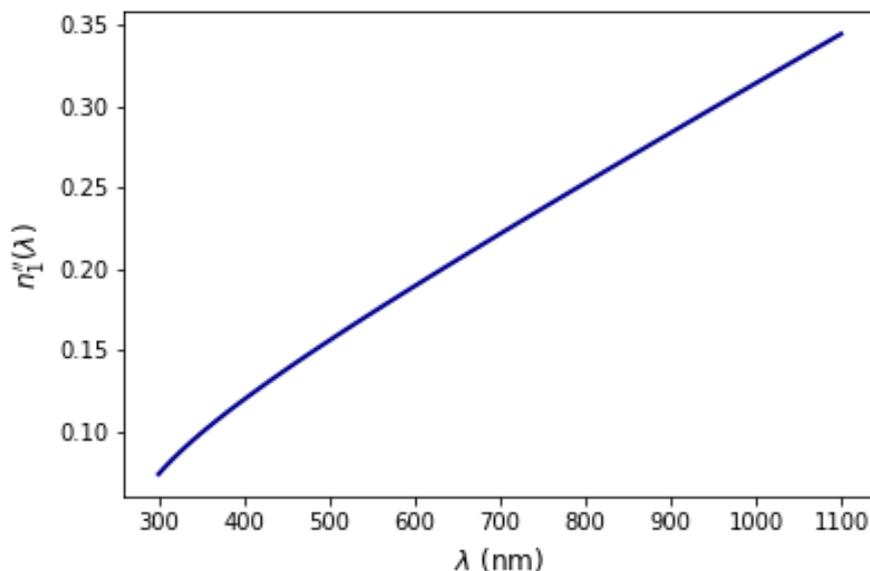


Рис. 10. Мнимая часть комплексного показателя преломления среды 1 из метаматериала 3 с фактором заполнения наночастицами серебра  $f_1 = 4\%$  от длины волны излучения. Показатель преломления матрицы плёнки равен  $n_1^m = -1.121 + i0.032$ .

На рис. 10 изображён график зависимости мнимой части комплексного показателя преломления среды 1 из метаматериала 3 с фактором заполнения наночастицами серебра  $f_1 = 4\%$  от длины волны излучения. Показатель преломления матрицы плёнки равен  $n_1^m = -1.121 + i0.032$ .

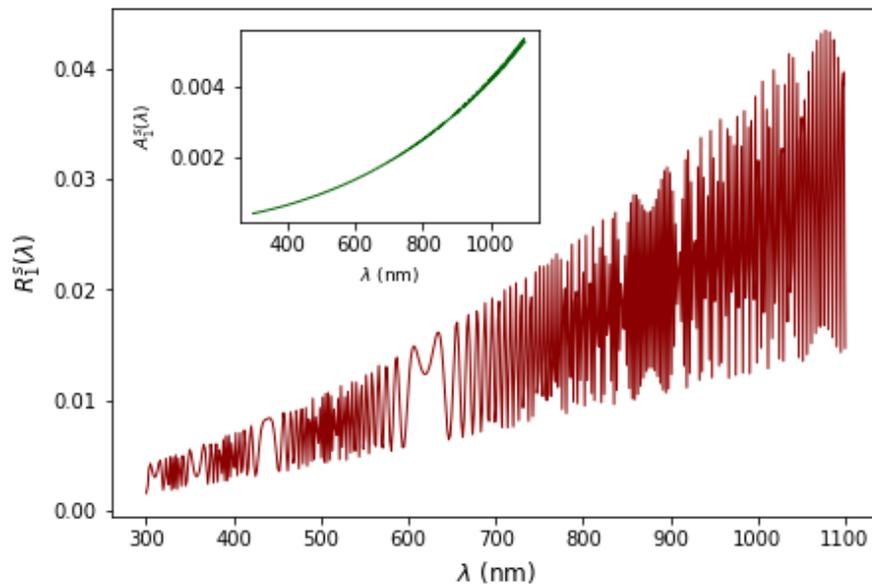


Рис. 11. Энергетический коэффициент отражения плёнки среды 1 толщиной  $d_1 = 120$  мкм из метаматериала 3 с фактором заполнения наночастицами серебра  $f_1 = 4\%$  от длины волны излучения. На вставке изображён энергетический коэффициент поглощения плёнки. Угол падения внешнего излучения  $\theta_0 = 3^\circ$ . Показатель преломления матрицы плёнки равен  $n_1^m = -1.121 + i0.032$ .

Рассмотрим результаты численных расчётов оптического отражения и пропускания нанокompозитной плёнки с наноразмерными включениями из метаматериала 3. На рис. 11 изображён график зависимости энергетического коэффициента отражения плёнки среды 1 толщиной  $d_1 = 120$  мкм из метаматериала 3 с фактором заполнения наночастицами серебра  $f_1 = 4\%$  от длины волны оптического излучения. На вставке изображён энергетический коэффициент поглощения плёнки. Угол падения внешнего излучения  $\theta_0 = 3^\circ$ . Показатель преломления матрицы плёнки равен  $n_1^m = -1.121 + i0.032$ .

На рис. 12 изображён график зависимости энергетического коэффициента пропускания плёнки среды 1 толщиной  $d_1 = 120$  мкм из метаматериала 3 с фактором заполнения наночастицами серебра  $f_1 = 4\%$  от длины волны излучения. Угол падения внешнего излучения  $\theta_0 = 3^\circ$ . Показатель преломления матрицы плёнки равен  $n_1^m = -1.121 + i0.032$ .

Вычислим комплексный показатель преломления среды 1 из метаматериала 4. На рис. 13 изображён график зависимости действительной части комплексного показателя преломления среды 1 из метаматериала 4 с фактором заполнения наночастицами серебра  $f_1 = 4\%$  от длины волны излучения. Показатель преломления матрицы плёнки равен  $n_1^m = -1.072 + i0.051$ .

На рис. 14 изображён график зависимости мнимой части комплексного показателя преломления среды 1 из метаматериала 4 с фактором заполнения наночастицами серебра  $f_1 = 4\%$  от длины волны излучения. Показатель преломления матрицы плёнки равен  $n_1^m = -1.072 + i0.051$ .

Рассмотрим результаты численных расчётов энергетических коэффициентов оптического отражения и пропускания нанокompозитной плёнки с наноразмерными включениями из метаматериала 4. На рис. 15 изображён график зависимости энергетического коэффициента отражения плёнки среды 1 толщиной  $d_1 = 120$  мкм из метаматериала 4 с фактором заполнения наночастицами серебра  $f_1 = 4\%$  от длины волны излучения. На вставке изображён энергетический коэффициент поглощения плёнки. Угол падения внешнего излучения  $\theta_0 = 3^\circ$ . Показатель преломления матрицы плёнки равен

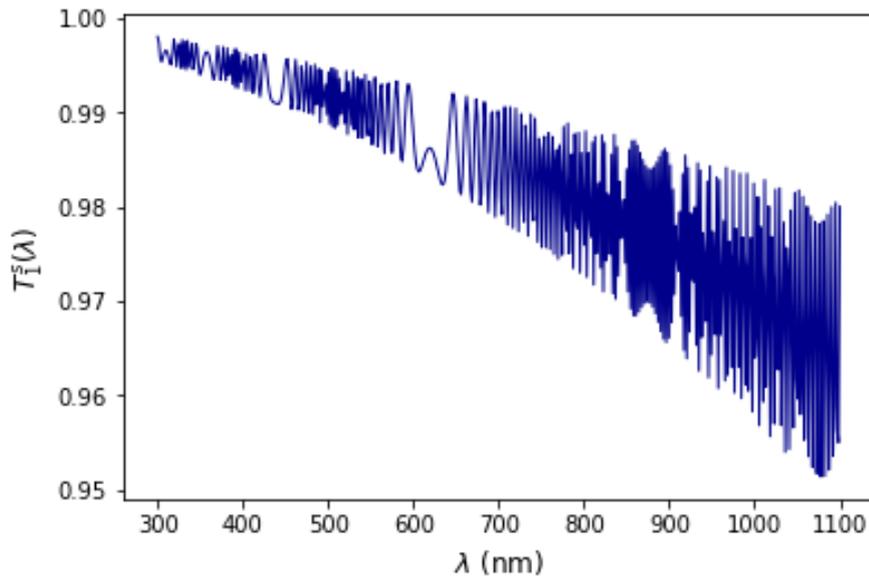


Рис. 12. Энергетический коэффициент пропускания плёнки среды 1 толщиной  $d_1 = 120$  мкм из метаматериала 3 с фактором заполнения наночастицами серебра  $f_1 = 4\%$  от длины волны излучения. Угол падения внешнего излучения  $\theta_0 = 3^\circ$ . Показатель преломления матрицы плёнки равен  $n_1^m = -1.121 + i0.032$ .

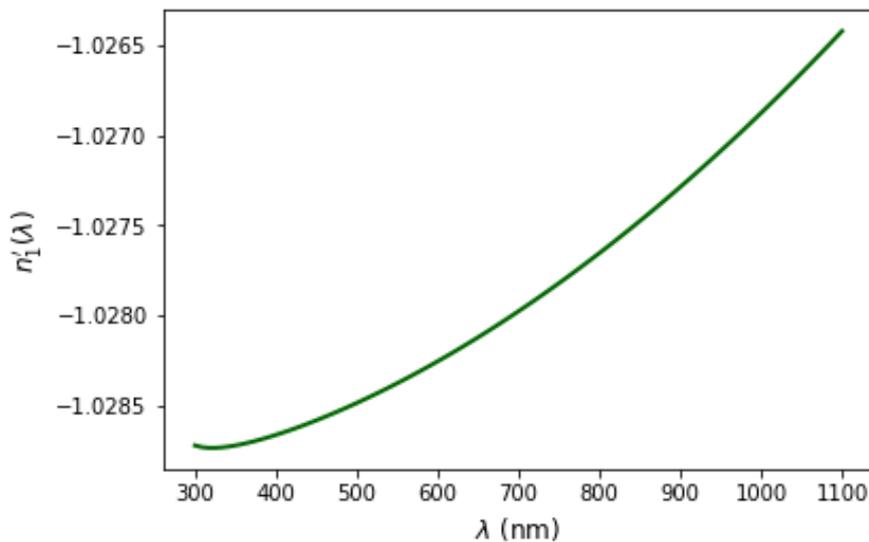


Рис. 13. Действительная часть комплексного показателя преломления среды 1 из метаматериала 4 с фактором заполнения наночастицами серебра  $f_1 = 4\%$  от длины волны излучения. Показатель преломления матрицы плёнки равен  $n_1^m = -1.072 + i0.051$ .

$$n_1^m = -1.072 + i0.051.$$

На рис. 16 изображён график зависимости энергетического коэффициента пропускания плёнки среды 1 толщиной  $d_1 = 120$  мкм из метаматериала 4 с фактором заполнения наночастицами серебра  $f_1 = 4\%$  от длины волны излучения. Угол падения внешнего излучения  $\theta_0 = 3^\circ$ . Показатель преломления матрицы плёнки равен  $n_1^m = -1.072 + i0.051$ .

Вычислим эффективный комплексный показатель преломления нанокompозитной среды 1 с наноразмерными включениями из метаматериала 5. На рис. 17 изображены графики зависимостей действительной и мнимой частей эффективного комплексного показателя преломления нанокompозитной среды 1 с наноразмерными включениями из

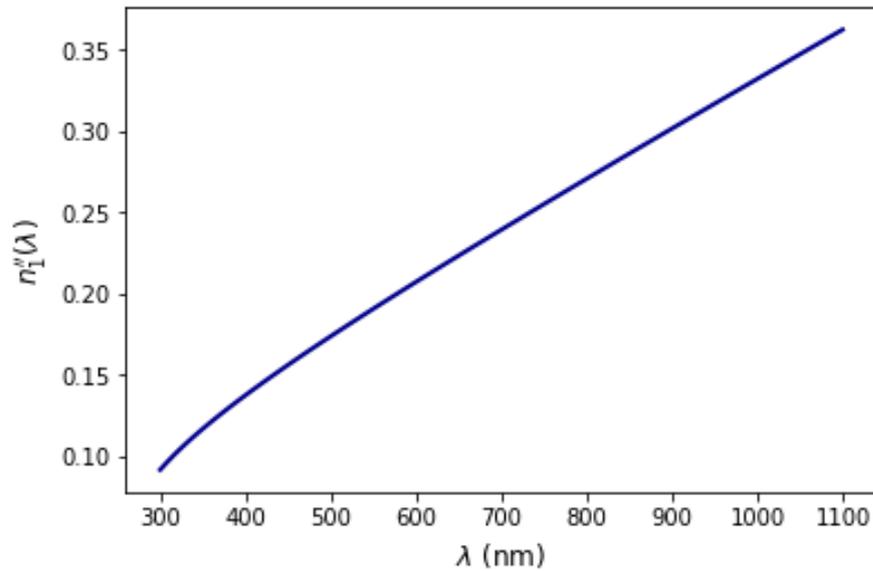


Рис. 14. Мнимая часть комплексного показателя преломления среды 1 из метаматериала 4 с фактором заполнения наночастицами серебра  $f_1 = 4\%$  от длины волны излучения. Показатель преломления матрицы плёнки равен  $n_1^m = -1.072 + i0.051$ .

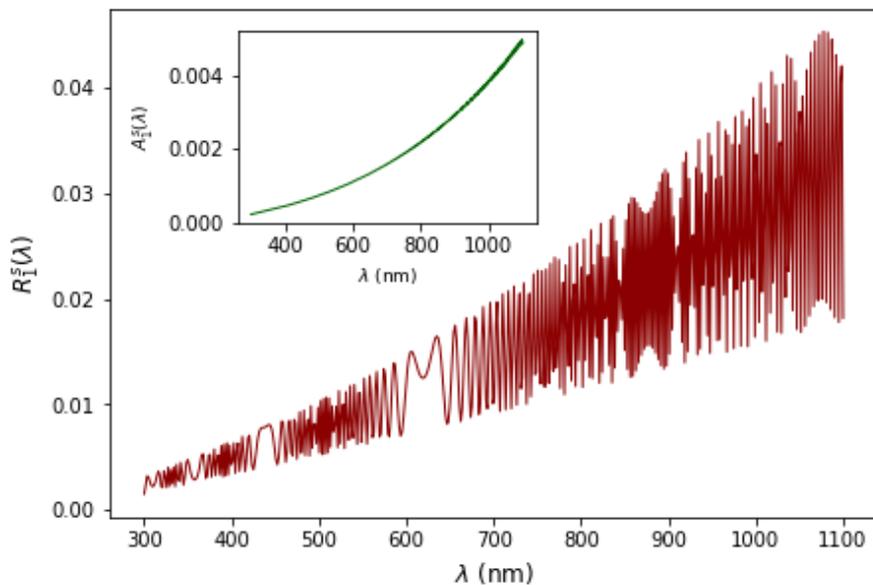


Рис. 15. Энергетический коэффициент отражения плёнки среды 1 толщиной  $d_1 = 120$  мкм из метаматериала 4 с фактором заполнения наночастицами серебра  $f_1 = 4\%$  от длины волны излучения. На вставке изображён энергетический коэффициент поглощения плёнки. Угол падения внешнего излучения  $\theta_0 = 3^\circ$ . Показатель преломления матрицы плёнки равен  $n_1^m = -1.072 + i0.051$ .

метаматериала 5 с фактором заполнения наночастицами серебра  $f_1 = 4\%$  от длины волны излучения. Показатель преломления матрицы плёнки равен  $n_1^m = 0.121 + i0.032$ .

Рассмотрим оптическое отражение и пропускание плёнки из метаматериала 5. На рис. 18 изображены графики зависимостей энергетического коэффициента отражения и энергетического коэффициента пропускания нанокompозитной плёнки среды 1 толщиной  $d_1 = 120$  мкм из метаматериала 5 с фактором заполнения наночастицами серебра  $f_1 = 4\%$  от длины волны излучения. На вставке изображён энергетический коэффи-

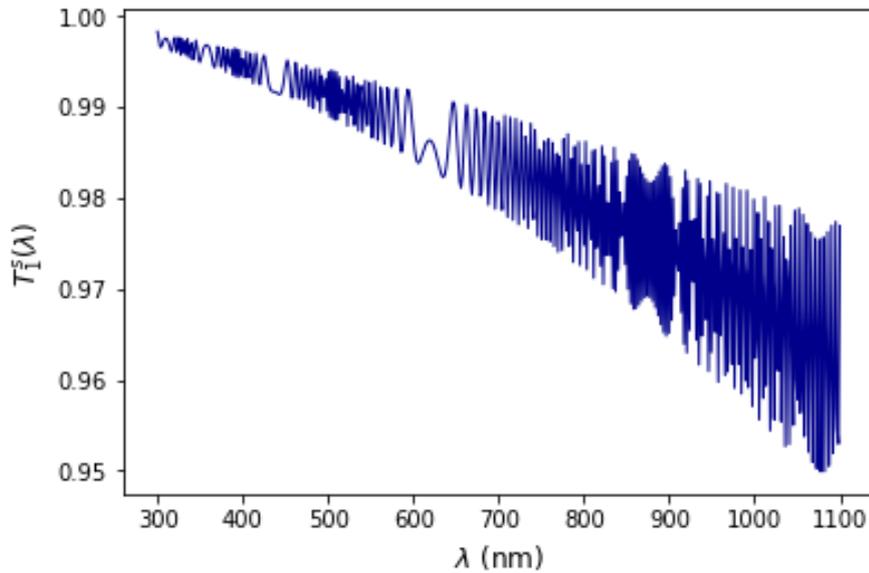


Рис. 16. Энергетический коэффициент пропускания плёнки среды 1 толщиной  $d_1 = 120$  мкм из метаматериала 4 с фактором заполнения наночастицами серебра  $f_1 = 4\%$  от длины волны излучения. Угол падения внешнего излучения  $\theta_0 = 3^\circ$ . Показатель преломления матрицы плёнки равен  $n_1^m = -1.072 + i0.051$ .

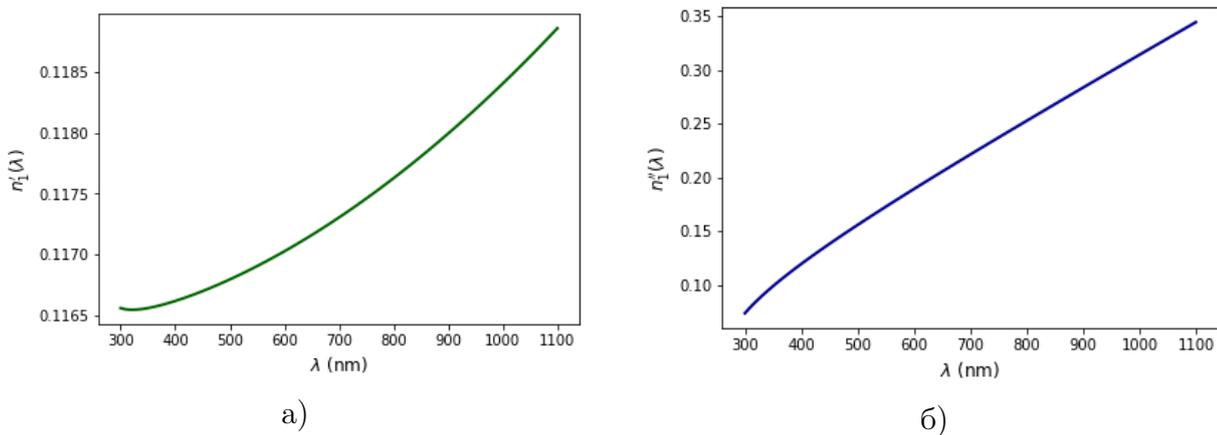


Рис. 17. Действительная часть (а) и мнимая (б) комплексного показателя преломления среды 1 из метаматериала 5 с фактором заполнения наночастицами серебра  $f_1 = 4\%$  от длины волны излучения. Показатель преломления матрицы плёнки равен  $n_1^m = 0.121 + i0.032$ .

циент поглощения плёнки. Угол падения внешнего излучения  $\theta_0 = 3^\circ$ . Показатель преломления матрицы плёнки равен  $n_1^m = 0.121 + i0.032$ .

Вычислим комплексный показатель преломления среды 1 из метаматериала 6. На рис. 19 изображён график зависимости действительной и мнимой частей комплексного показателя преломления среды 1 из метаматериала 6 с фактором заполнения наночастицами серебра  $f_1 = 4\%$  от длины волны излучения. Показатель преломления матрицы плёнки равен  $n_1^m = 0.072 + i0.051$ .

Рассмотрим оптическое отражение и пропускание нанокompозитной плёнки из метаматериала 6. На рис. 20 изображены графики зависимостей энергетического коэффициента отражения и энергетического коэффициента пропускания нанокompозитной плёнки среды 1 толщиной  $d_1 = 120$  мкм из метаматериала 6 с фактором заполнения наночастицами серебра  $f_1 = 4\%$  от длины волны излучения. На вставке изображён

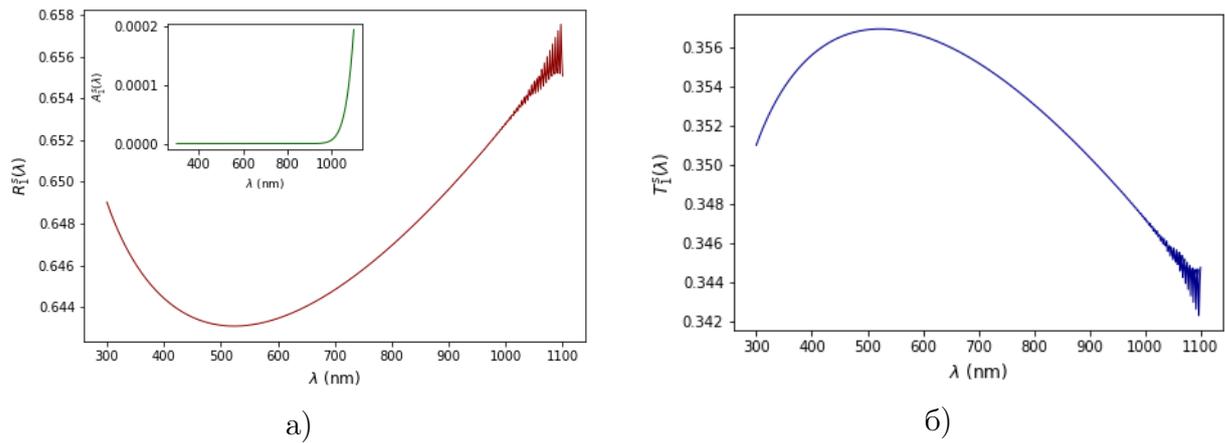


Рис. 18. Энергетический коэффициент отражения (а) и энергетический коэффициент пропускания (б) плёнки среды 1 толщиной  $d_1 = 120$  мкм из метаматериала 5 с фактором заполнения наночастицами серебра  $f_1 = 4\%$  от длины волны излучения. На вставке изображён энергетический коэффициент поглощения плёнки. Угол падения внешнего излучения  $\theta_0 = 3^\circ$ . Показатель преломления матрицы плёнки равен  $n_1^m = 0.121 + i0.032$ .

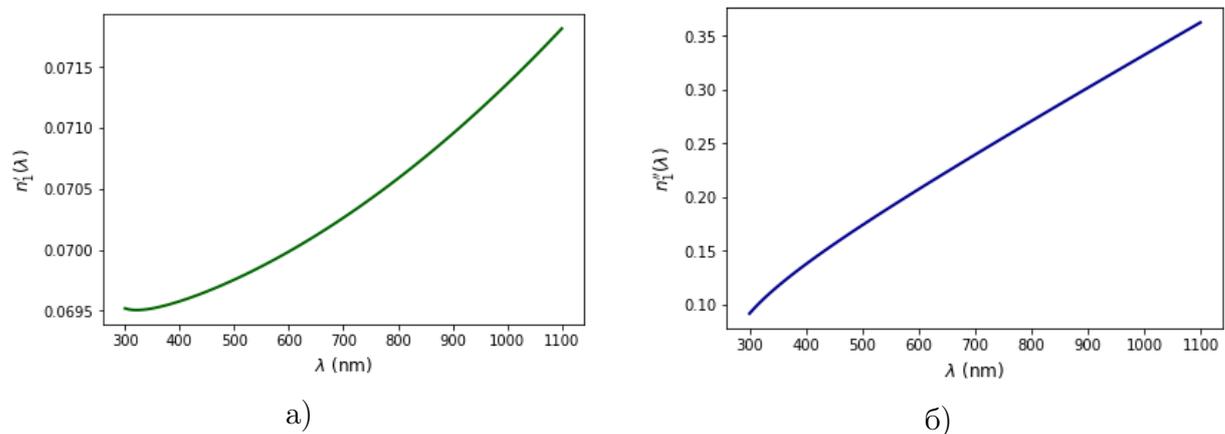


Рис. 19. Действительная часть (а) и мнимая часть (б) комплексного показателя преломления среды 1 из метаматериала 6 с фактором заполнения наночастицами серебра  $f_1 = 4\%$  от длины волны излучения. Показатель преломления матрицы плёнки равен  $n_1^m = 0.072 + i0.051$ .

энергетический коэффициент поглощения плёнки. Угол падения внешнего излучения  $\theta_0 = 3^\circ$ . Показатель преломления матрицы плёнки равен  $n_1^m = 0.072 + i0.051$ .

## Закключение

Разработка и изучение метаматериалов на основе комбинации металлов и диэлектриков имеет важнейшее значение для современной оптики и оптоэлектроники, поскольку такие наносистемы из метаматериалов обладают уникальным набором химических, физических, физико-механических и эксплуатационных свойств. Характеристики таких метаматериалов сложным образом зависят от структурных параметров, таких как состав, форма и размер включений (наночастиц, нанопроволок, нанослоёв, квантовых наносистем), распределение их по размерам, равномерность расположения включений в объёме матрицы наносистемы из метаматериалов. Построена модель для теоретического описания процессов оптического отражения и пропускания нанокомпозитной плёнки из метаматериала, находящейся в поле оптического излучения.

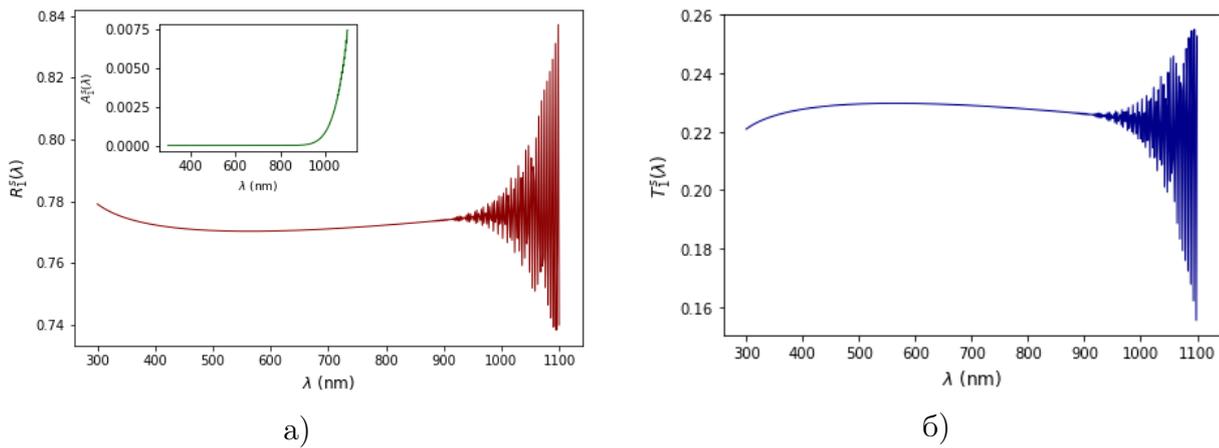


Рис. 20. Энергетический коэффициент отражения (а) и энергетический коэффициент пропускания (б) нанокompозитной плёнки среды 1 толщиной  $d_1 = 120$  мкм из метаматериала 6 с фактором заполнения наночастицами серебра  $f_1 = 4\%$  от длины волны излучения. На вставке изображён энергетический коэффициент поглощения плёнки. Угол падения внешнего излучения  $\theta_0 = 3^\circ$ . Показатель преломления матрицы плёнки равен  $n_1^m = 0.072 + i0.051$ .

По результатам работы можно сделать следующие выводы:

1. В результате написания обзора литературы по оптическим свойствам сред из метаматериалов показана актуальность разработки теоретических и численных моделей метаматериалов для создания новых наноразмерных оптоэлектронных устройств наноплазмоники и наноплазмоники с применением метаматериалов, обладающих отрицательными значениями эффективного показателя преломления в широком оптическом диапазоне длин волн излучения.
2. Разработана теоретическая модель для адекватного описания оптического отражения, поглощения и пропускания плёнкой из метаматериала, обладающего отрицательным значением эффективного показателя преломления.
3. Показано, что можно повысить оптическое пропускание границы раздела с плёнкой из метаматериала, обладающего отрицательными значениями эффективного комплексного показателя преломления, при изменении фактора заполнения и размеров металлических наночастиц. Плёнки из метаматериалов, состоящие из матрицы в виде метаматериала с отрицательным показателем преломления и системы наноразмерных включений из металлических наночастиц, обладают повышенным оптическим пропусканием через границу раздела с плёнкой из метаматериала.

В ходе написания работы использовались методы классической и квантовой нанооптики для проведения теоретических вычислений оптических характеристик нанокompозитных плёнок из метаматериалов, а также численные методы расчёта оптических характеристик нанокompозитных плёнок из метаматериалов.

Поставленная в работе гипотеза исследования, состоящая в том, что если провести исследование оптических свойств нанокompозитных плёнок из метаматериала, то можно разработать оригинальные материалы для проектирования новых наноразмерных оптоэлектронных приборов, полностью подтверждена численными расчётами оптического отражения и пропускания нанокompозитных плёнок из метаматериалов на основе левосторонних сред.

В настоящее время можно сделать вывод о перспективности данного подхода к описанию искусственных нелинейных метаматериалов и сред из метаматериалов, которые

будут обладать уникальными характеристиками. Использование нелинейных метаматериалов и сред из метаматериалов позволит разработать новые и модернизировать достаточно широкий круг радиоэлектронных устройств СВЧ-диапазона (детекторы, преобразователи частоты, аттенюаторы, эквивалентные нагрузки, фильтры мод и гармоник радиосигнала), а также устройств наноэлектроники, акустоэлектроники и широкополосных телекоммуникационных систем. Особое значение имеет разработка нелинейных метаматериалов и сред из метаматериалов, в которых физические эффекты, производящие внутри наноразмерных включений, начинают проявлять макроскопические свойства. При определённой степени наполнения наноразмерными включениями однородной диэлектрической или магнитной матрицы всё сильнее должны сказываться квантовые эффекты, связанные с туннельной проводимостью метаматериалов в отличие от диффузионного характера проводимости обычных материалов. Метаматериалы могут быть использованы для обеспечения электромагнитной совместимости различных радиотехнических систем.

### Список использованных источников

1. Marqués Ricardo, Medina Francisco, Rafii-El-Idrissi Rachid. Role of bianisotropy in negative permeability and left-handed metamaterials // *Physical Review B*. — 2002. — apr. — Vol. 65, no. 14. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.65.144440>.
2. Centeno Emmanuel, Ciraci Cristian. Theory of backward second-harmonic localization in nonlinear left-handed media // *Physical Review B*. — 2008. — dec. — Vol. 78, no. 23. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.78.235101>.
3. Bliokh Yury P., Savel'ev Sergey, Nori Franco. Electron-Beam Instability in Left-Handed Media // *Physical Review Letters*. — 2008. — jun. — Vol. 100, no. 24. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.100.244803>.
4. Kemp Brandon A., Kong Jin Au, Grzegorz Tomasz M. Reversal of wave momentum in isotropic left-handed media // *Physical Review A*. — 2007. — may. — Vol. 75, no. 5. — URL: <https://doi.org/10.1103/physreva.75.053810>.
5. Enhanced localization of Dyakonov-like surface waves in left-handed materials / L.-C. Crasovan [et al.] // *Physical Review B*. — 2006. — oct. — Vol. 74, no. 15. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.74.155120>.
6. Left-Handed Interfaces for Electromagnetic Surface Waves / A. V. Kats [et al.] // *Physical Review Letters*. — 2007. — feb. — Vol. 98, no. 7. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.98.073901>.
7. Negative diffraction pattern dynamics in nonlinear cavities with left-handed materials / Pascal Kockaert [et al.] // *Physical Review A*. — 2006. — sep. — Vol. 74, no. 3. — URL: <https://doi.org/10.1103/physreva.74.033822>.
8. Cheng Qiang, Cui Tie Jun. High-power generation and transmission through a left-handed material // *Physical Review B*. — 2005. — sep. — Vol. 72, no. 11. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.72.113112>.
9. Cheng Qiang, Cui Tie Jun. Negative refractions in uniaxially anisotropic chiral media // *Physical Review B*. — 2006. — mar. — Vol. 73, no. 11. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.73.113104>.

10. Grzegorzczuk Tomasz M., Kong Jin Au. Electrodynamics of moving media inducing positive and negative refraction // *Physical Review B*. — 2006. — jul. — Vol. 74, no. 3. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.74.033102>.
11. Cui Tie Jun, Kong Jin Au. Time-domain electromagnetic energy in a frequency-dispersive left-handed medium // *Physical Review B*. — 2004. — nov. — Vol. 70, no. 20. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.70.205106>.
12. Electromagnetic-field quantization and spontaneous decay in left-handed media / Ho Trung Dung [et al.] // *Physical Review A*. — 2003. — oct. — Vol. 68, no. 4. — URL: <https://doi.org/10.1103/physreva.68.043816>.
13. Power Propagation in Homogeneous Isotropic Frequency-Dispersive Left-Handed Media / J. Pacheco [et al.] // *Physical Review Letters*. — 2002. — dec. — Vol. 89, no. 25. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.89.257401>.
14. Left-Handed-Media Simulation and Transmission of EM Waves in Subwavelength Split-Ring-Resonator-Loaded Metallic Waveguides / R. Marqués [et al.] // *Physical Review Letters*. — 2002. — oct. — Vol. 89, no. 18. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.89.183901>.
15. Hu Liangbin, Chui S. T. Characteristics of electromagnetic wave propagation in uniaxially anisotropic left-handed materials // *Physical Review B*. — 2002. — aug. — Vol. 66, no. 8. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.66.085108>.
16. Pendry J. B. Negative Refraction Makes a Perfect Lens // *Physical Review Letters*. — 2000. — oct. — Vol. 85, no. 18. — P. 3966–3969. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.85.3966>.
17. Smith D. R., Schurig D. Electromagnetic Wave Propagation in Media with Indefinite Permittivity and Permeability Tensors // *Physical Review Letters*. — 2003. — feb. — Vol. 90, no. 7. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.90.077405>.
18. Hyperbolic metamaterials / Alexander Poddubny [et al.] // *Nature Photonics*. — 2013. — nov. — Vol. 7, no. 12. — P. 948–957. — URL: <https://doi.org/10.1038/nphoton.2013.243>.
19. Jacob Zubin, Alekseyev Leonid V., Narimanov Evgenii. Optical Hyperlens: Far-field imaging beyond the diffraction limit // *Optics Express*. — 2006. — Vol. 14, no. 18. — P. 8247. — URL: <https://doi.org/10.1364/oe.14.008247>.
20. Rosenblatt Gilad, Orenstein Meir. Power drainage and energy dissipation in lossy but perfect lenses // *Physical Review A*. — 2017. — may. — Vol. 95, no. 5. — URL: <https://doi.org/10.1103/physreva.95.053857>.
21. Electromagnetic wave localization using a left-handed transmission-line superlens / Tie Jun Cui [et al.] // *Physical Review B*. — 2005. — jul. — Vol. 72, no. 3. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.72.035112>.
22. Near-field effect in composite nanomaterials with a quasi-zero refractive index / O. N. Gadomsky [et al.] // *Optics Communications*. — 2014. — mar. — Vol. 315. — P. 286–294. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.optcom.2013.11.035>.

23. Altunin K. K., Gadomsky O. N. High-negative effective refractive index of silver nanoparticles system in nanocomposite films // Optics Communications. — 2012. — mar. — Vol. 285, no. 5. — P. 816–820. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.optcom.2011.11.033>.
24. Born M., Wolf E. Principles of Optics. — Oxford : Pergamon Press, 1969. — 720 p.

**Сведения об авторах:**

**Константин Константинович Алтунин** — кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры физики и технических дисциплин ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова»

E-mail: kostya\_altunin@mail.ru

ORCID iD  0000-0002-0725-9416

Web of Science ResearcherID  I-5739-2014

SCOPUS ID  57201126207

**Инна Алексеевна Шарнина** — студент факультета физико-математического и технологического образования ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», Ульяновск, Россия.

E-mail: inna\_sharnina27@mail.ru

ORCID iD  0000-0002-9777-7996

Web of Science ResearcherID  ABI-2941-2020

# Investigation of the optical properties of a composite metamaterial with a matrix made of a material with a negative refractive index

K. K. Altunin , I. A. Sharnina 

*Ulyanovsk State Pedagogical University, 432071, Ulyanovsk, Russia*

Submitted January 18, 2021

Resubmitted February 16, 2021

Published June 12, 2021

---

**Abstract.** The optical properties of a nanocomposite material with a metamaterial matrix with a negative refractive index are considered. Numerical calculations of the energy coefficients of optical transmission and reflection from the wavelength of optical radiation have been carried out. Graphs of the dependence of the energy coefficients of optical transmission and reflection on the wavelength of optical radiation for various parameters of composite metamaterials are plotted. It is shown that it is possible to effectively control the optical transmission of a nanocomposite material by changing the parameters of the inclusions and the matrix of the nanocomposite material. It has been shown that nanocomposite films made of metamaterials, consisting of a matrix in the form of a metamaterial with a negative refractive index and a system of nanosized inclusions of metal nanoparticles, have an increased optical transmission through the interface with a metamaterial film.

**Keywords:** nanocomposite, metamaterial, composite medium, optical radiation, optical transmission, optical reflection, refractive index, Maxwell equations, optoelectronic device

PACS: 42.25.Bs

---

## References

1. Marqués Ricardo, Medina Francisco, Rafii-El-Idrissi Rachid. Role of bianisotropy in negative permeability and left-handed metamaterials // *Physical Review B*. — 2002. — apr. — Vol. 65, no. 14. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.65.144440>.
2. Rosenblatt Gilad, Orenstein Meir. Power drainage and energy dissipation in lossy but perfect lenses // *Physical Review A*. — 2017. — may. — Vol. 95, no. 5. — URL: <https://doi.org/10.1103/physreva.95.053857>.
3. Electromagnetic wave localization using a left-handed transmission-line superlens / Tie Jun Cui [et al.] // *Physical Review B*. — 2005. — jul. — Vol. 72, no. 3. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.72.035112>.
4. Centeno Emmanuel, Ciraci Cristian. Theory of backward second-harmonic localization in nonlinear left-handed media // *Physical Review B*. — 2008. — dec. — Vol. 78, no. 23. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.78.235101>.
5. Bliokh Yury P., Savel'ev Sergey, Nori Franco. Electron-Beam Instability in Left-Handed Media // *Physical Review Letters*. — 2008. — jun. — Vol. 100, no. 24. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.100.244803>.

6. Kemp Brandon A., Kong Jin Au, Grzegorz Tomasz M. Reversal of wave momentum in isotropic left-handed media // *Physical Review A*. — 2007. — may. — Vol. 75, no. 5. — URL: <https://doi.org/10.1103/physreva.75.053810>.
7. Enhanced localization of Dyakonov-like surface waves in left-handed materials / L.-C. Crasovan [et al.] // *Physical Review B*. — 2006. — oct. — Vol. 74, no. 15. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.74.155120>.
8. Left-Handed Interfaces for Electromagnetic Surface Waves / A. V. Kats [et al.] // *Physical Review Letters*. — 2007. — feb. — Vol. 98, no. 7. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.98.073901>.
9. Negative diffraction pattern dynamics in nonlinear cavities with left-handed materials / Pascal Kockaert [et al.] // *Physical Review A*. — 2006. — sep. — Vol. 74, no. 3. — URL: <https://doi.org/10.1103/physreva.74.033822>.
10. Cheng Qiang, Cui Tie Jun. High-power generation and transmission through a left-handed material // *Physical Review B*. — 2005. — sep. — Vol. 72, no. 11. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.72.113112>.
11. Cheng Qiang, Cui Tie Jun. Negative refractions in uniaxially anisotropic chiral media // *Physical Review B*. — 2006. — mar. — Vol. 73, no. 11. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.73.113104>.
12. Grzegorz Tomasz M., Kong Jin Au. Electrodynamics of moving media inducing positive and negative refraction // *Physical Review B*. — 2006. — jul. — Vol. 74, no. 3. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.74.033102>.
13. Cui Tie Jun, Kong Jin Au. Time-domain electromagnetic energy in a frequency-dispersive left-handed medium // *Physical Review B*. — 2004. — nov. — Vol. 70, no. 20. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.70.205106>.
14. Electromagnetic-field quantization and spontaneous decay in left-handed media / Ho Trung Dung [et al.] // *Physical Review A*. — 2003. — oct. — Vol. 68, no. 4. — URL: <https://doi.org/10.1103/physreva.68.043816>.
15. Power Propagation in Homogeneous Isotropic Frequency-Dispersive Left-Handed Media / J. Pacheco [et al.] // *Physical Review Letters*. — 2002. — dec. — Vol. 89, no. 25. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.89.257401>.
16. Left-Handed-Media Simulation and Transmission of EM Waves in Subwavelength Split-Ring-Resonator-Loaded Metallic Waveguides / R. Marqués [et al.] // *Physical Review Letters*. — 2002. — oct. — Vol. 89, no. 18. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.89.183901>.
17. Hu Liangbin, Chui S. T. Characteristics of electromagnetic wave propagation in uniaxially anisotropic left-handed materials // *Physical Review B*. — 2002. — aug. — Vol. 66, no. 8. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.66.085108>.
18. Pendry J. B. Negative Refraction Makes a Perfect Lens // *Physical Review Letters*. — 2000. — oct. — Vol. 85, no. 18. — P. 3966–3969. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.85.3966>.

19. Smith D. R., Schurig D. Electromagnetic Wave Propagation in Media with Indefinite Permittivity and Permeability Tensors // *Physical Review Letters*. — 2003. — feb. — Vol. 90, no. 7. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.90.077405>.
20. Hyperbolic metamaterials / Alexander Poddubny [et al.] // *Nature Photonics*. — 2013. — nov. — Vol. 7, no. 12. — P. 948–957. — URL: <https://doi.org/10.1038/nphoton.2013.243>.
21. Jacob Zubin, Alekseyev Leonid V., Narimanov Evgenii. Optical Hyperlens: Far-field imaging beyond the diffraction limit // *Optics Express*. — 2006. — Vol. 14, no. 18. — P. 8247. — URL: <https://doi.org/10.1364/oe.14.008247>.
22. Born M., Wolf E. *Principles of Optics*. — Oxford : Pergamon Press, 1969. — 720 p.
23. Near-field effect in composite nanomaterials with a quasi-zero refractive index / O. N. Gadomsky [et al.] // *Optics Communications*. — 2014. — mar. — Vol. 315. — P. 286–294. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.optcom.2013.11.035>.
24. Altunin K. K., Gadomsky O. N. High-negative effective refractive index of silver nanoparticles system in nanocomposite films // *Optics Communications*. — 2012. — mar. — Vol. 285, no. 5. — P. 816–820. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.optcom.2011.11.033>.

**Information about authors:**

**Konstantin Konstantinovich Altunin** – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Physics and Technical Disciplines of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ulyanovsk State Pedagogical University”, Ulyanovsk, Russia.

E-mail: [kostya.altunin@mail.ru](mailto:kostya.altunin@mail.ru)

ORCID iD  0000-0002-0725-9416

Web of Science ResearcherID  I-5739-2014

SCOPUS ID  57201126207

**Inna Alekseevna Sharnina** — student of the Faculty of Physics, Mathematics and Technological Education of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ulyanovsk State Pedagogical University”, Ulyanovsk, Russia.

E-mail: [inna\\_sharnina27@mail.ru](mailto:inna_sharnina27@mail.ru)

ORCID iD  0000-0002-9777-7996

Web of Science ResearcherID  ABI-2941-2020

УДК 535.3  
ББК 22.343  
ГРНТИ 29.31.21  
ВАК 01.04.05

## Исследование оптических характеристик ультратонких нанокompозитных плёнок с помощью численных вычислений на языке Python

К. К. Алтунин , Е. А. Купреянова  <sup>1</sup>

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», 432071, Ульяновск, Россия

Поступила в редакцию 5 апреля 2021 года  
После переработки 12 апреля 2021 года  
Опубликована 12 июня 2021 года

**Аннотация.** Рассматриваются физические особенности оптических процессов в ультратонких нанокompозитных плёнках и плёночных наносистемах. Проведены численные расчёты пропускательной и отражательной способностей ультратонких нанокompозитных плёнок, находящихся во внешнем поле оптического излучения. Для вычисления оптических характеристик составлена компьютерная программа на языке программирования Python, которая позволяет строить графики зависимостей отражательной и пропускательной способностей от длины волны внешнего оптического излучения. Получены зависимости энергетических коэффициентов оптического пропускания и отражения ультратонких нанокompозитных плёнок от длины волны излучения в оптическом диапазоне длин волн при различных значениях параметров ультратонких нанокompозитных плёнок. Показано, что можно эффективно управлять величиной оптического пропускания оптического излучения путём изменения параметров ультратонких нанокompозитных плёнок.

**Ключевые слова:** нанокompозитная плёнка, ультратонкая нанокompозитная плёнка, наноструктурное покрытие, металлические наночастицы, наночастицы серебра, оптическое излучение, коэффициент оптического пропускания, коэффициент оптического отражения, просветляющее оптическое покрытие, оптические приборы, наносистема

PACS: 42.25.Bs

## Введение

В современной оптике проявляется повышенный научный интерес к ультратонким нанокompозитным плёнкам в связи с возможностью высокоэффективного просветления поверхностей оптических приборов и устройств оптоэлектроники. Просветляющие оптические покрытия используют наносистемы со сложной структурой наноразмерных слоёв и плёнок. Внутри просветляющих нанокompозитных покрытий металлические

<sup>1</sup>E-mail: kupreyanova.zhenechka@mail.ru

наночастицы могут организовываться в такие наноструктурные элементы, как нанокластеры и наноагрегаты. Границы раздела поверхностей сред даже покрывают монослоями наночастиц для повышения просветляющей способности поверхности твёрдого тела. В связи с этим тема работы, посвящённая исследованию физических свойств ультратонких нанокompозитных плёнок, является актуальной темой современной фундаментальной физики. Результаты проведения численных расчётов оптических характеристик ультратонких нанокompозитных плёнок должны помочь выработке стратегии изготовления наноструктурных покрытий из ультратонких нанокompозитных плёнок. Ультратонкие нанокompозитные плёнки нашли широкое применение в устройствах и приборах оптики и оптоэлектроники.

Целью исследования является выяснение свойств ультратонких нанокompозитных плёнок, находящихся в поле оптического излучения. В задачи работы входит исследование теоретической модели оптических процессов в ультратонких нанокompозитных плёнках и плёночных наносистемах, проведение численных расчётов оптических характеристик ультратонких нанокompозитных плёнок и плёночных наносистем на языке программирования Python.

Объектом исследования являются ультратонкие нанокompозитные плёнки. Предметом исследования являются физические характеристики оптических процессов в ультратонких нанокompозитных плёнках.

Для фундаментальных исследований наиболее важной является возможность изучения самых различных наносистем в условиях, когда и расстояние между наночастицами и их взаимная ориентация строго фиксированы. Именно эта ситуация и реализуется в ультратонких нанокompозитных плёнках. Можно изучать спектральные проявления взаимодействий валентных электронов как внутри наночастицы, так и в соседних наночастицах. Более того, уже ведутся исследования направленных модификаций ультратонких нанокompозитных плёнок с помощью мультислойных наносистем.

Гипотеза исследования заключается в том, что если использовать теоретические модели оптических процессов в ультратонких плёнках, плёночных наносистемах из нанокompозитных материалов и результаты численных расчётов оптических характеристик ультратонких нанокompозитных плёнок, то можно прогнозировать оптические свойства приборов и устройств на основе плёночных наносистем из нанокompозитных материалов.

Методами исследования являются теоретические и численные методы нанооптики ультратонких плёнок из нанокompозитных материалов, состоящих из диэлектрической матрицы и металлических наночастиц.

## **Обзор работ по свойствам и методам получения ультратонких нанокompозитных плёнок**

В последнее время достигнут значительный прогресс в подходах и технологиях нанесения нанопокровов, тонких и ультратонких плёнок. В настоящее время нанотехнология позволяет получать ультратонкие плёнки и нанопокровы, состоящие всего из одного монослоя или нескольких атомных слоёв. Такие ультратонкие плёнки могут функционализировать поверхность, чтобы поддерживать желаемые химические взаимодействия, или, наоборот, пассивировать поверхность, чтобы сделать её химически инертной. Образование собственного оксида толщиной в несколько атомных слоёв на поверхности многих полупроводниковых материалов является примером поверхностной пассивации. Нанотехнологии революционизируют применение нанопокровов во многих областях, особенно с учетом возможности изготовления нанопокровов со специальным покрытием. спроектированная наноархитектура, например, покрытия на основе нанокompозитных полимеров, состоящие из сетки металлических наночастиц, ориентирован-

ных металлических наностержней, нанопроволок или нанотрубок. Возникновение явлений, связанных с возбуждением поверхностных плазмон-поляритонов и отрицательным преломлением, открывает новые возможности для развития новые фокусирующие оптические элементы со сверхвысоким разрешением.

Плѐнки Ленгмюра–Блоджетт широко изучаются [1–4] как модельные системы для изучения различных физических, химических и биологических явлений в системах с уменьшенной размерностью. Для формирования плѐнок Ленгмюра–Блоджетт используется простой процесс, который включает последовательную передачу органического монослоя, разбросанного по воде или другим жидкостям путѐм повторного погружения подложки. Несмотря на обширные исследования, легкость образования этих плѐнок, имеющих исключительно хорошо упорядоченный стабильный молекулярный слой, остаѐтся загадкой даже через 80 лет после открытия этого метода. С первых лет разработки этого метода хорошо известно, что границы раздела, присутствующие в этих плѐнках, довольно жѐсткие и резкие, и можно наносить плѐнку даже на проволочную сетку. Хотя недавние достижения в методах измерений, такие как метод скользящего падения рентгеновских лучей [5] и сканирующая зондовая микроскопия [1], а также прогресс в теоретических формализмах [6] для изучения структуры поверхностей и границ раздела улучшили наше понимание структуры плѐнок Ленгмюра–Блоджетт [1, 7–10]. Мы до сих пор не располагаем исчерпывающими сведениями о точном механизме образования и устойчивости таких плѐнок. Понимание образования полупроводниковых частиц нанометрового размера, которые обладают размерным эффектом в зонной структуре, имеет важное значение [11].

Различия во взаимодействии неполярных углеводородных цепей (короткодействующих) с полярными “головными группами” (дальние) могут приводить к разным двумерным позиционно упорядоченным фазам с корреляционной длиной, зависящей от плотности и температуры, а с другой “родственные” молекулы могут приводить к различным ориентационно упорядоченным фазам. Обширные исследования амилофильных монослоѐв на поверхности воды рассмотрели оба эти аспекта и установили связь между упорядочением связей и ориентационным упорядочением цепей и позиционным упорядочением молекул [12–14].

В этих двумерных системах существует два способа выделения жидкости из твѐрдого тела. Первое связано с ориентационным порядком связей в “решѐтке” составляющих, будь то атомы, молекулы, кластеры, дырки или вихри. Здесь ориентационный порядок длинной связи в гексагональной решетке обозначает гексатическую фазу, а этот порядок нарушается в жидкой фазе путѐм перехода к случайно распределенным многоугольным устройствам. Поскольку микроскопический порядок в твѐрдых телах проявляется в возникновении плоскостей спайности и зѐрен в их пробое, эта случайность в микроскопическом склеивании грубо зернируется в случайно соединенные отверстия или пузырьки в сложных жидкостях, таких как мыльные плѐнки [15]. Второе отличие происходит от наличия однородного поверхностного натяжения на поверхности жидкости в равновесии, которое реагирует на деформацию в любом масштабе длины путѐм рассеивания этого напряжения через капиллярные волны. Следовательно, поверхность жидкости характеризуется капиллярными волнами, вызывающими колебания высоты любой длины волны в диапазоне, определяемом размером молекул и размером выборки, что приводит к логарифмической корреляции по высоте с разделением плоскости [16] без какого-либо обрезания. Это контрастирует с самоаффинной корреляцией высоты с явной “корреляционной длиной” или обрезанием и алгебраической зависимостью от деления в плоскости [16], наблюдаемого на твѐрдых поверхностях.

В то время как большая часть исследований корреляций высот в амфифильных монослоях на поверхности воды была проведена на нетронутых амфифилах, таких как

длинноцепочечные жирные кислоты [17] с некоторыми исключениями [18, 19], как наличие противоионов и, в частности, конкретные ионы двухвалентного металла, в воде изменяет эти корреляции далеко не ясно. С другой стороны, поскольку только двухвалентные металлосодержащие амфифильные жирные кислоты образуют стабильные многослойные плёнки [20], на их основе были проведены корреляционные исследования по толщине. Чтобы быть более конкретным, многослойные только кадмиевые соли этих жирных кислот были тщательно изучены [10, 21, 22]. Оба этих многослойных Ленгмюра и многослойные исследования Ленгмюра–Блоджетта показывают, что они имеют корреляцию по высоте в жидкости, когда область наблюдения велика [10, 17, 19, 22], в то время как мультислои проявляют самоаффинную корреляцию по малым длинам сканирования [10, 22]. Однако мало информации о том, что происходит в многослойных материалах при изменении металла, а также о любой связи между жидкоподобным или твёрдоподобным поведением металлоносного амфифильного монослоя на воде и корреляциями высоты, полученными в многослойных пленках на твёрдых подложках того же амфифил.

В настоящее время органические мультислои играют важную роль в исследованиях тонкоплёночных технологий. Возможными применениями плёнок с органическими мультислоями являются покрытия из стекловолокна для передачи света, высокоскоростные оптические элементы управления в микроэлектронике, улучшение качества поверхности зеркал и детекторов для органических молекул в качестве биосенсорных устройств [23, 24].

Развивается новая область — молекулярная электроника [25], ставящая одной из своих задач создание элементов с размерами, характерными для молекул. На этом пути предполагается решить серьезные физические проблемы, ограничивающие применение полупроводниковых интегральных схем.

Уже сегодня полимеризующиеся тонкие плёнки Ленгмюра–Блоджетт используются для электронно-лучевой литографии сверхвысокого разрешения, а также в качестве диэлектрических покрытий в структурах металл–диэлектрик–металл. В последнем случае лэнгмюровская плёнка может не только выполнять функцию высокопрочного (в механическом, химическом и электрическом смысле) диэлектрика, но и быть активным элементом, чувствительным к внешним воздействиям, например тепловому (пирозлектрик), механическому (пьезоэлектрик) или имеющему химическую природу (химический сенсор). Весьма перспективным применением представляется также использование ультратонких плёнок Ленгмюра–Блоджетт в качестве оптических волноводов, особенно в том случае, когда соответствующий материал обладает ещё и нелинейно-оптическими свойствами.

Плёнки Ленгмюра–Блоджетт используются как активные элементы в солнечных батареях. Также они могут играть роль диэлектрического покрытия, пирозлектрика или пьезоэлектрика. Плёнки Ленгмюра–Блоджетт применяются практически во всех типах сенсоров.

В статье [26] рассматриваются агрегаты, образованные из коллоидных частиц, будут различаться по форме в зависимости от преобладающего режима агрегации. Компактные структуры образуются при медленной агрегации, в то время как рыхлые тонкие структуры образуются, когда преобладает быстрое (или ограниченное диффузией) агрегация. Эти структуры могут быть фрактальными по своей природе, то есть существует взаимосвязь между пористостью и количеством первичных частиц, составляющих агрегат, и описывается фрактальной размерностью. Фрактальные размеры агрегатов гематита были измерены экспериментально методом статического светорассеяния [26]. Фрактальные размеры менялись в зависимости от режимов агрегации; для режима быстрой агрегации было обнаружено, что фрактальная размерность составляет 2.8, в

то время как для условий, в которых агрегация была медленной (преобладают силы замедления), фрактальная размерность составляет 2.3. Для условий, которые приводят к агрегации, в которых участвуют как силы диффузии, так и силы замедления, были обнаружены структуры с такими фрактальными размерами, что фрактальная размерность находится в диапазоне от 2.3 до 2.8. Также было исследовано влияние адсорбированной фульвокислоты, встречающейся в природе органической кислоты, на кинетику агрегации гематита и получаемую структуру агрегатов гематита. Изучение структуры агрегатов показывает, что фрактальные размерности агрегатов гематита, частично покрытых молекулами фульвокислоты, выше, чем у агрегатов без адсорбированной фульвокислоты. Показатели рассеяния, полученные из экспериментов по статическому светорассеянию этих агрегатов, находятся в диапазоне от  $2.83 \pm 0.08$  до  $3.42 \pm 0.1$ . Показатели рассеяния больше 3 указывают на то, что рассеяние является результатом объектов, содержащих поры, ограниченные поверхностями с фрактальной структурой, и может быть связано только с фрактальной размерностью поверхности. Высокие фрактальные размерности обусловлены перестройкой агрегатов, которая происходила только при низком покрытии органической кислотой.

В статье [27] рассматривается динамическое рассеяние света в качестве метода, используемого для определения размера наноразмерных и субмикронных частиц путём измерения их теплового движения (диффузии) в жидкой среде. Измеренные коэффициенты диффузии связаны с гидродинамическим размером частиц через уравнение Стокса-Эйнштейна. Рассматривается применение динамического рассеяния света для характеристики разбавленных суспензий пирогенного кремнезема, которые состоят из полидисперсных фрактальных агрегатов, состоящих из спеченных сферических первичных частиц. Моделирование используется для установления взаимосвязи между структурными свойствами агрегатов и их диффузионным поведением. Поэтому разработан алгоритм, позволяющий генерировать агрегаты с настраиваемой фрактальной размерностью и произвольным числом первичных частиц. Результаты свидетельствуют о том, что гидродинамические радиусы показывают другое масштабирование по сравнению со структурным радиусом инерции, что имеет большое значение для интерпретации результатов динамического рассеяния света. Кроме того, при измерениях необходимо учитывать влияние вращательной диффузии.

В статье [28] рассматривается структурированный свет, происходящий от способности адаптировать свет, обычно имея в виду пространственный контроль его амплитуды, фазы и поляризации. Несмотря на то, что эта почтенная тема восходит к самым первым лазерным конструкциям, структурирование света у источника за последнее десятилетие вызвало бурный рост активности, подпитываемый современным инструментарием, который использует универсальность дифракционных структур, жидких кристаллов, метаповерхностей или метаматериалов, и экзотическими геометриями лазеров, а также множество приложений, которые варьируются от получения изображений, микроскопии и лазерной обработки материалов до оптической связи. Недавний прогресс в создании и управлении структурированным светом позволяет сделать особый акцент на структурирование света в лазерной источнике структурированного света. Различные подходы к проектированию, включая формирование накачки, геометрию резонатора и использование специальных внутрирезонаторных оптических элементов, реализованных в различных лазерах, от микрочиповых решений до высокомошных волокон, описаны в учебном стиле.

Дистанционное зондирование с использованием различных способов обнаружения света и дальности используется для приложений обнаружения целей, построения изображений и определения дальности. Для точного определения диапазона в качестве источников света использовались либо лазеры с высокой пиковой мощностью коротких

импульсов, либо модулированные лазерные диоды непрерывного действия. В методе коротких импульсов разрешение по дальности, которое определяется шириной импульса, обычно находится в диапазоне метров. В методе модулированной непрерывной волны обнаружение и локализация цели осуществляются либо путём корреляции формы сигнала, отражённого или рассеянного от цели, с опорной формой волны с задержкой по времени, либо путём оптического воздействия на них с помощью интерферометра Майкельсона, где разрешение по дальности определяется ширина полосы модулированного сигнала. Ограниченное скоростью кода и скоростью модуляции, разрешающая способность детектирования и определения дальности света с кодовой модуляцией псевдослучайным числом находится в диапазоне нескольких десятков метров.

На инструментах, изготовленных из кварцита, было проведено несколько исследований с использованием микролинз [29]. Большинство из них полагаются на визуальное наблюдение характеристик микроволокон с помощью оптических световых микроскопов и сканирующих электронных микроскопов. Микрошероховатость кварцевого инструмента редко определяется количественно, хотя для математического документирования шероховатости поверхности с помощью других силикатных инструментов применялись многочисленные методы. В статье [29] с помощью лазерной сканирующей конфокальной микроскопии была задокументирована шероховатость поверхности четырёх экспериментальных скребков, сделанных из двух разных подтипов кварцита Мистассини, которые использовались либо для свежей, либо для сухой оленьей шкуры. Данные о шероховатости поверхности были проанализированы с использованием фрактальной сложности в масштабе площади. Результаты этого тестового примера показывают, что анализ с использованием фрактальной сложности в масштабе площади позволяет эффективно различать неиспользуемые и использованные области на инструментах из кварцита на основе шероховатости поверхности, а также что он может различать шероховатость сухой и свежей кожи. Различия в подтипах кварцита Мистассини действительно повлияли на шероховатость поверхности, но не настолько, чтобы предотвратить различие между инструментами из сухой и свежей кожи. Хотя использование параметра фрактальной сложности в масштабе площади для анализа каменных микролинейок требует дальнейшего тестирования, эти первые результаты предполагают, что это может быть надежным методом для математического документирования и различения структур износа на археологических инструментах из кварцита.

В статье [30] представлена печатная антенна Ван Коха на фрактальной подложке с фотонной запрещённой зоной. Подложка состоит из заземленных печатных элементов Ван Коха. Конструкция представляет собой многочастотный излучатель, похожий на обычную фрактальную антенну, но особый синтез подложки увеличивает полосу частот и коэффициент усиления и заставляет антенну излучать поле с круговой поляризацией.

Для многих приложений для самолётов, спутников, мобильной и беспроводной связи требуются низкопрофильные антенны. Микрополосковые антенны представляют собой, пожалуй, наиболее предпочтительный вид излучателей для этих современных приложений. К сожалению, все структурные характеристики печатных элементов (размер, вес, возможность компланарного изготовления), составляющий их низкий профиль, должен быть сопоставлен с недостатками их низкой эффективности и узкой полосы частот. Кроме того, для большинства современных приложений требуется многочастотный режим, поле с круговой поляризацией и возможно высокое усиление. С развитием систем беспроводной связи, которые работают в многочастотных диапазонах, растёт спрос на многополосные антенны и микроволновые устройства. Для мобильных телефонов очень привлекательны планарные антенны, поскольку эти антенны имеют низкий профиль, а также могут быть просто изготовлены на системной плате мобильного телефона для практического применения.

## Теория эффективной среды для описания оптических свойств ультратонких нанокompозитных плёнок и нанопокpытий

Ультратонкие плёнки и нанопокpытия играют важную роль во многих областях, таких как микроэлектроника и наноэлектроника, машиностроение, автомобилестроение и авиастроение, робототехника. Нанопокpытия, в частности, представляют собой интерфейс между продуктом и окружающей средой и поэтому определяют не только эстетические аспекты товаров, но и важные специфические свойства, такие как, например, антикоррозийная, самоочищающаяся, химическая стойкость и устойчивость к царапинам. Термин «нанопокpытия» обычно используется, когда покpытие наноструктурированное или его толщина находится в нанометровом масштабе. Наноструктурирование обычно применяется из-за его способности повышать гидрофобность, радиационную стойкость и коррозионную стойкость, а также потому, что оно делает материалы намного более гибкими. Ультратонкие плёнки и нанопокpытия представляют собой двумерные системы, то есть свободные электроны в проводящих системах может распространяться только в плоскости  $xOy$ . Ограничение в  $z$ -направлении может добавить много специфических характеристик, особенно в случае электронных материалов. Правильно разработанные ультратонкие плёнки и нанопокpытия иногда используются для уменьшения трения и отражения света, для модификации поверхности в экстремальных условиях и для улучшения свойств удаления грязи. В настоящее время возрастает интерес к нанофазным термобарьерным покpытиям, которые обладают чрезвычайно низкой теплопроводностью. Большое внимание также уделяется декоративным нанопокpытиям на основе специальных красок и чернил. Существуют различные методы производства ультратонких плёнок и нанопокpытий: вакуумное напыление, термическое напыление, электрохимическое напыление, основывающееся на испарении, распылении, термическом разложении. Среди методов термического напыления можно упомянуть плазменное напыление и дуговое напыление, а также высокоскоростной процесс термического напыления кислородного топлива, который обеспечивает получение покpытий высокой плотности с уникальными характеристиками в условиях агрессивного износа и коррозионных сред. Фактически, наиболее широко используемые промышленные процессы нанесения покpытий основаны на гальванике и химическом осаждении. Эти подходы относительно просты и экономичны и применимы для самых разных покpытий.

Рассмотрим модель, которая используется для определения диэлектрической функции нанокompозитного слоя, содержащего включения одинаковых наночастиц, распределённых на подложке. Эффективная диэлектрическая функция  $\varepsilon_{\text{eff}}$  нанокompозитного слоя связывает макроскопическую поляризацию  $\mathbf{P}$  и макроскопическое электрическое поле  $\mathbf{E}_{\text{eff}}$ ,

$$\mathbf{P} = \varepsilon_0(\varepsilon_{\text{eff}} - \varepsilon_{\text{cap}})\mathbf{E}_{\text{ext}}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_{\text{eff}}$  – диэлектрическая проницаемость среды и  $\varepsilon_{\text{cap}}$  – диэлектрическая функция сетчатой плёнки, содержащей пустоты.

В других отношениях макроскопическая поляризация является суммой микроскопических поляризаций частиц:  $\mathbf{P} = N\mathbf{p}$ , где  $N$  – количество частиц на единицу объёма.  $\mathbf{P}$  можно выразить как

$$\mathbf{P} = N\varepsilon_{\text{eff}}\varepsilon_{\text{cap}}V\alpha\mathbf{E}_{\text{loc}}, \quad (2)$$

где  $V\alpha$  – поляризуемость частицы объёма  $V$  и  $\alpha = \frac{\varepsilon_m - \varepsilon_{\text{cap}}}{\varepsilon_{\text{cap}} + \ell(\varepsilon_m - \varepsilon_{\text{cap}})}$  (где  $\ell$  является геометрическим фактором деполяризации эллипсоидальной наночастицы и  $\varepsilon_m$  – это диэлектрическая функция металла) и  $\mathbf{E}_{\text{loc}}$  – это локальное поле в точке расположения одной центральной частицы. Это поле даёт три вклада: макроскопическое приложенное

электрическое поле  $\mathbf{E}_{\text{ext}}$  поле, созданное диполем изображения  $\mathbf{E}_{\text{im}}$  частицы, а поле, созданное соседними частицами и их изображениями  $\mathbf{E}_{\text{int}}$ .

Предположим, что поле  $\mathbf{E}_{\text{dip}}$ , созданное диполем  $\mathbf{p}$ , устанавливаем в 0 на расстоянии  $r$  от точки  $M$  в среде с диэлектрической функцией  $\varepsilon_{\text{ext}}$ , тогда оно даётся выражением

$$\mathbf{E}_{\text{dip}} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_{\text{cap}}H^3} \frac{\varepsilon_{\text{sub}} - \varepsilon_{\text{cap}}}{\varepsilon_{\text{sub}} + \varepsilon_{\text{cap}}} \mathbf{p} \quad (3)$$

Это поле равно нулю, если подложка идентична материалу покрытия, то есть  $\varepsilon_{\text{sub}} = \varepsilon_{\text{cap}}$ . Вклад  $\mathbf{E}_{\text{int}} = \mathbf{E}_{\text{neighb}} + \mathbf{E}_{\text{im,neighb}}$  соседних частиц ( $\mathbf{E}_{\text{neighb}}$ ) и их изображений ( $\mathbf{E}_{\text{im,neighb}}$ ) задаётся выражением

$$\mathbf{E}_{\text{neighb}} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_{\text{cap}}} \sum_j \frac{3(\mathbf{p}_j \cdot \mathbf{u}_{rj})\mathbf{u}_{rj} - \mathbf{p}_j}{r_j^3} \quad (4)$$

и

$$\mathbf{E}_{\text{im,neighb}} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_{\text{cap}}} \sum_j \frac{3(\mathbf{p}_j \cdot \mathbf{u}_{rj})\mathbf{u}'_{rj} - \mathbf{p}'_j}{r_j'^3}, \quad (5)$$

где  $\mathbf{p}'_j$  является дипольным моментом изображения диполей соседние частицы. Эти диполи расположены на расстоянии  $r'_j$  от центральной частицы.

Предполагая, что все наночастицы имеют тот же дипольный момент  $\mathbf{p} = \mathbf{p}_j$  (то есть, та же поляризуемость) локальное поле может быть записано как

$$\mathbf{E}_{\text{loc}} = \frac{\mathbf{E}_{\text{ext}}}{1 + \varepsilon_0\varepsilon_{\text{cap}}\alpha\beta}. \quad (6)$$

где

$$\beta = \frac{V}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_{\text{cap}}} \left[ \frac{1}{H^3} \frac{\varepsilon_{\text{sub}} - \varepsilon_{\text{cap}}}{\varepsilon_{\text{sub}} + \varepsilon_{\text{cap}}} - \sum_j \frac{3 \cos^2 \theta_j - 1}{r_j^3} - \frac{\varepsilon_{\text{sub}} - \varepsilon_{\text{cap}}}{\varepsilon_{\text{sub}} + \varepsilon_{\text{cap}}} \sum_j \frac{3 \cos^2 \theta_j - 1}{r_j'^3} \right] \quad (7)$$

и  $\theta_j$  – это угол между векторами  $\mathbf{u}_j$  и  $\mathbf{p}_j$ .

Условие

$$C = \sum_j \frac{3 \cos^2 \theta_j - 1}{r_j'^3} \quad (8)$$

учитывает вклад в локальное поле соседних наночастиц и их изображений. Для наночастиц, регулярно расположенных на прямоугольной решетке,  $C$  зависит от частиц размером  $H$  и параметров решётки. Поэтому диэлектрическую функцию эффективной среды можно получить из уравнений и в виде

$$\varepsilon_0 (\varepsilon_{\text{eff}} - \varepsilon_{\text{cap}}) \mathbf{E}_{\text{ext}} = N\varepsilon_0\varepsilon_{\text{cap}}V\alpha\mathbf{E}_{\text{loc}} = N\varepsilon_0\varepsilon_{\text{cap}}V \frac{\varepsilon_{\text{m}} - \varepsilon_{\text{cap}}}{\varepsilon_{\text{cap}} - l(\varepsilon_{\text{m}} - \varepsilon_{\text{cap}})}. \quad (9)$$

Используя уравнение (6), получаем

$$\varepsilon_0 (\varepsilon_{\text{eff}} - \varepsilon_{\text{cap}}) = NV \frac{\varepsilon_{\text{cap}} (\varepsilon_{\text{eff}} - \varepsilon_{\text{cap}})}{\varepsilon_{\text{cap}} + l(\varepsilon_{\text{m}} - \varepsilon_{\text{cap}})} \frac{1}{1 + \varepsilon_0\varepsilon_{\text{cap}}\alpha\beta}. \quad (10)$$

Эффективная диэлектрическая функция нанокompозитного слоя задаётся

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \varepsilon_{\text{cap}} \left[ q \frac{\varepsilon_{\text{m}} - \varepsilon_{\text{cap}}}{\varepsilon_{\text{cap}} + F(\varepsilon_{\text{m}} - \varepsilon_{\text{cap}})} + 1 \right], \quad (11)$$

где  $q = NV$  и  $F = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_{\text{cap}}}{\varepsilon_m - \varepsilon_{\text{cap}}} \alpha \beta + \ell (1 + \varepsilon_0 \varepsilon_{\text{cap}} \alpha \beta)$  является эффективным коэффициентом деполяризации, учитывающим форму частиц, межчастичные дипольные взаимодействия и взаимодействия с подложкой.

Есть две общие теории эффективной среды. Первая теория — это диэлектрическая функция Максвелла-Гарнетта, которая рассматривает разбавленную систему включений. Сложность этого подхода состоит в том, что он асимметричен относительно включений и матрицы. Вторая теория — это приближение эффективной среды Бруггемана, которое является симметричным относительно включений и матрицы и не ограничивается каким-либо конкретным диапазоном концентраций. Ещё одно преимущество диэлектрической функции приближения эффективной среды состоит в том, что она правильно предсказывает порог перколяции для сферических зёрен.

Поскольку металлические включения могут составлять большой объём образца, выбрали диэлектрическую функцию приближения эффективной среды Бруггемана. Для включений со сложной диэлектрической проницаемостью  $\tilde{\varepsilon}_a$  с объёмной долей  $f$  в матрице  $\tilde{\varepsilon}_b$  аппроксимирующая диэлектрическая проницаемость эффективной среды  $\tilde{\varepsilon}$  является корнем квадратичного выражения:

$$f \frac{\tilde{\varepsilon}_a - \tilde{\varepsilon}}{\tilde{\varepsilon}_a + \phi_c \tilde{\varepsilon}} + (1 - f) f \frac{\tilde{\varepsilon}_b - \tilde{\varepsilon}}{\tilde{\varepsilon}_b + \phi_c \tilde{\varepsilon}}, \quad (12)$$

где физическое решение — это то решение, которое имеет  $\text{Im}\{\tilde{\varepsilon}\} > 0$ . Здесь  $\phi_c (1 - g_c) / g_c$ , где  $g_c$  — коэффициент деполяризации сфероида,

$$g_c = \frac{1 - e_c^2}{e_c^2} \left( \frac{1}{e_c} \arctan(e_c) - 1 \right). \quad (13)$$

Для сфероида с длиной оси фигуры  $c$  и длиной поперечной оси  $a$  эксцентриситет сфероида равен  $e_c = \sqrt{1 - a^2/c^2}$ . Диэлектрическая функция приближения эффективной среды аппроксимируется коэффициентом отражения с использованием нелинейного метода наименьших квадратов; коэффициент отражения выбран потому, что он представляет собой комбинацию действительной и мнимой частей диэлектрической функции, в отличие от действительной части проводимости, которая зависит только от мнимой части  $\tilde{\varepsilon}$ . Несмотря на то, что измерение является усреднённым по объёму, при низких температурах реальная часть диэлектрической функции падает ниже нуля на низких частотах, что указывает на слабое металлическое состояние. Предполагается, что включения являются металлическими в нормальном состоянии (сверхпроводящие ниже  $T_c$ ) со сложной диэлектрической функцией, которая может быть описана простой моделью Друде [31]:

$$\tilde{\varepsilon}_a(\omega) = \varepsilon_\infty - \frac{\omega_{p,D}^2}{\omega^2 + i\omega/\tau_D}, \quad (14)$$

где  $\varepsilon_\infty$  — действительная часть диэлектрической проницаемости на высоких частотах,  $\omega_{p,D}^2 = 4\pi n e^2 / m^*$  и  $1/\tau_D$  — квадрат плазменной частоты и скорости рассеяния для делокализованных носителей соответственно, а  $m^*$  — эффективная масса. Предполагается, что матрица изолирующая со сложной диэлектрической функцией, состоящей только из осцилляторов Лоренца,

$$\tilde{\varepsilon}_b(\omega) = \varepsilon_\infty + \sum_j \frac{\Omega_j^2}{\omega_j^2 - \omega^2 - i\omega\gamma_j}, \quad (15)$$

где  $\omega_j$ ,  $\gamma_j$  и  $\Omega_j$  — положение, ширина и сила осциллятора  $j$ -го колебания.

Модель Максвелла-Гарнетта была одним из первых подходов к описанию диэлектрической проницаемости случайных нанокомпозитов. В этой модели среднего поля

для каждого включения учитывается только средний индуцированный диполь. Вышние мультипольные моменты не учитываются. И так, каждая частица поляризована, как если бы она находилась в однородном эффективном поле:

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \varepsilon_m \left( 1 + \frac{1}{A} \frac{fx}{1 - fx} \right), \quad (16)$$

где

$$x = \frac{A(\varepsilon_p - \varepsilon_m)}{\varepsilon_m + A(\varepsilon_p - \varepsilon_m)}. \quad (17)$$

$\varepsilon_p$ ,  $\varepsilon_m$  – диэлектрические проницаемости включений и матрицы соответственно,  $f$  – объёмная доля наночастиц. Коэффициент деполаризации  $A$  равен  $1/3$  в случае сфер. Для проводящих включений на достаточно низких частотах выполняется  $|\varepsilon_p| \gg |\varepsilon_m|$  и, следовательно,  $x = 1$ , так что

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \varepsilon_m \frac{1 + 2f}{1 - f}. \quad (18)$$

Модель Максвелла–Гарнетта считалась удовлетворительной, когда точные межчастичные взаимодействия не важны, например, в случае разбавленных дисперсий или компонентов с низкой поляризуемостью.

Модель, которая чаще всего хорошо согласуется с экспериментальными результатами для нанокомпозитов, получена Бруггеманом

$$\left( \frac{\varepsilon_{\text{eff}} - \varepsilon_p}{\varepsilon_m - \varepsilon_p} \right) \left( \frac{\varepsilon_m}{\varepsilon_{\text{eff}}} \right)^{1/3} = 1 - f, \quad (19)$$

или для проводящих частиц на низких частотах

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \frac{\varepsilon_m}{(1 - f)^3}. \quad (20)$$

Эта формула, известная как асимметричная формула Бруггемана или формула Ханаи–Бруггемана, получается в предположении, что для нанокомпозитной среды теоретическая модель смешения Максвелла–Гарнетта является точной при низких факторах заполнения, а затем после итерационной процедуры, добавляющей небольшую долю частиц на каждом этапе. Здесь предел перколяции  $f = 1$ . Эта модель признана действительной, по крайней мере, для не слишком высоких коэффициентов заполнения и часто используется для сравнения с экспериментальными данными или результатами моделирования.

## Результаты численных расчётов оптических характеристик для ультратонких нанокомпозитных плёнок и покрытий

Для вычисления эффективной диэлектрической проницаемости слоистой структуры, содержащего  $n$  слоёв, при условии последовательного соединения слоёв будем пользоваться следующей формулой смешения

$$\varepsilon_{\text{eff}} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\varepsilon_i}}, \quad (21)$$

где  $d_i$  – толщина  $i$ -го слоя. Энергетические коэффициенты отражения и пропускания для слоя вычисляются по обычным формулам классической оптики. Эти формулы пригодны для толстых, тонких и ультратонких плёнок.

Амплитудные коэффициенты Френеля вычисляются по формулам:

$$r_2 = \frac{r_{01} + r_{01}r_{12}r_{23} \exp(i2\phi_2) + (r_{12} + r_{23} \exp(i2\phi_2)) \exp(i2\phi_2)}{1 + r_{12}r_{23} \exp(i2\phi_2) + r_{01}(r_{12} + r_{23} \exp(i2\phi_2)) \exp(i2\phi_2)} \quad (22)$$

$$r_{01}^s = \frac{n_0 \cos \theta_0 - \tilde{n}_1 \cos \theta_1}{n_0 \cos \theta_0 + \tilde{n}_1 \cos \theta_1}, \quad (23)$$

$$r_{12}^s = \frac{\tilde{n}_1 \cos \theta_1 - \tilde{n}_2 \cos \theta_2}{\tilde{n}_1 \cos \theta_1 + \tilde{n}_2 \cos \theta_2}, \quad (24)$$

$$r_{23}^s = \frac{\tilde{n}_2 \cos \theta_2 - \tilde{n}_3 \cos \theta_3}{\tilde{n}_2 \cos \theta_2 + \tilde{n}_3 \cos \theta_3}. \quad (25)$$

В работе разработана компьютерная программа для расчёта оптического отражения и пропускания ультратонких нанокomпозитных плёнок.

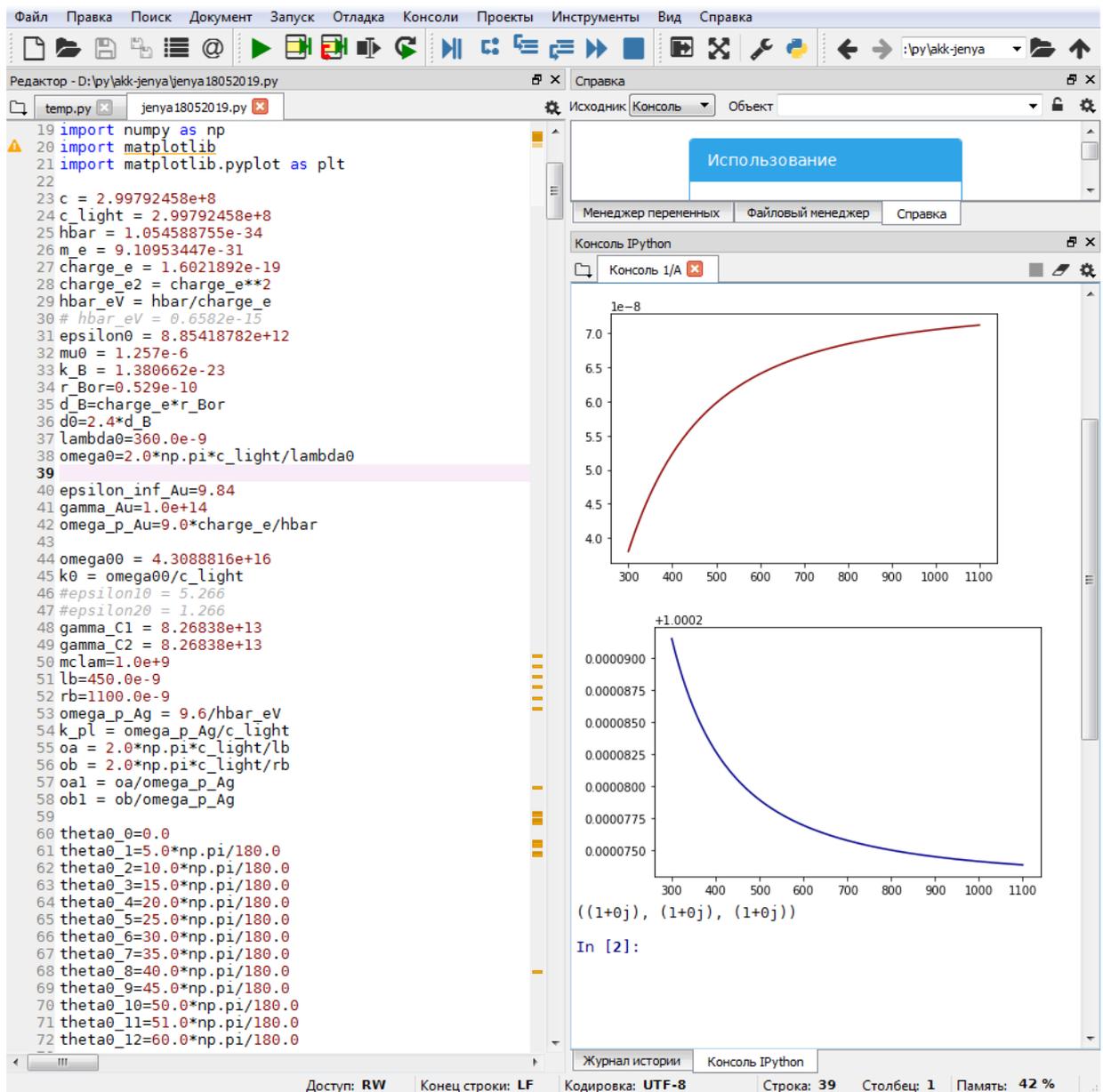


Рис. 1. Первая часть компьютерной программы на языке программирования Python для расчёта оптического отражения и пропускания ультратонких нанокomпозитных плёнок.

На рис. 1 изображена первая часть компьютерной программы на языке программирования Python для расчёта оптического отражения и пропускания ультратонких нанокompозитных плёнок.

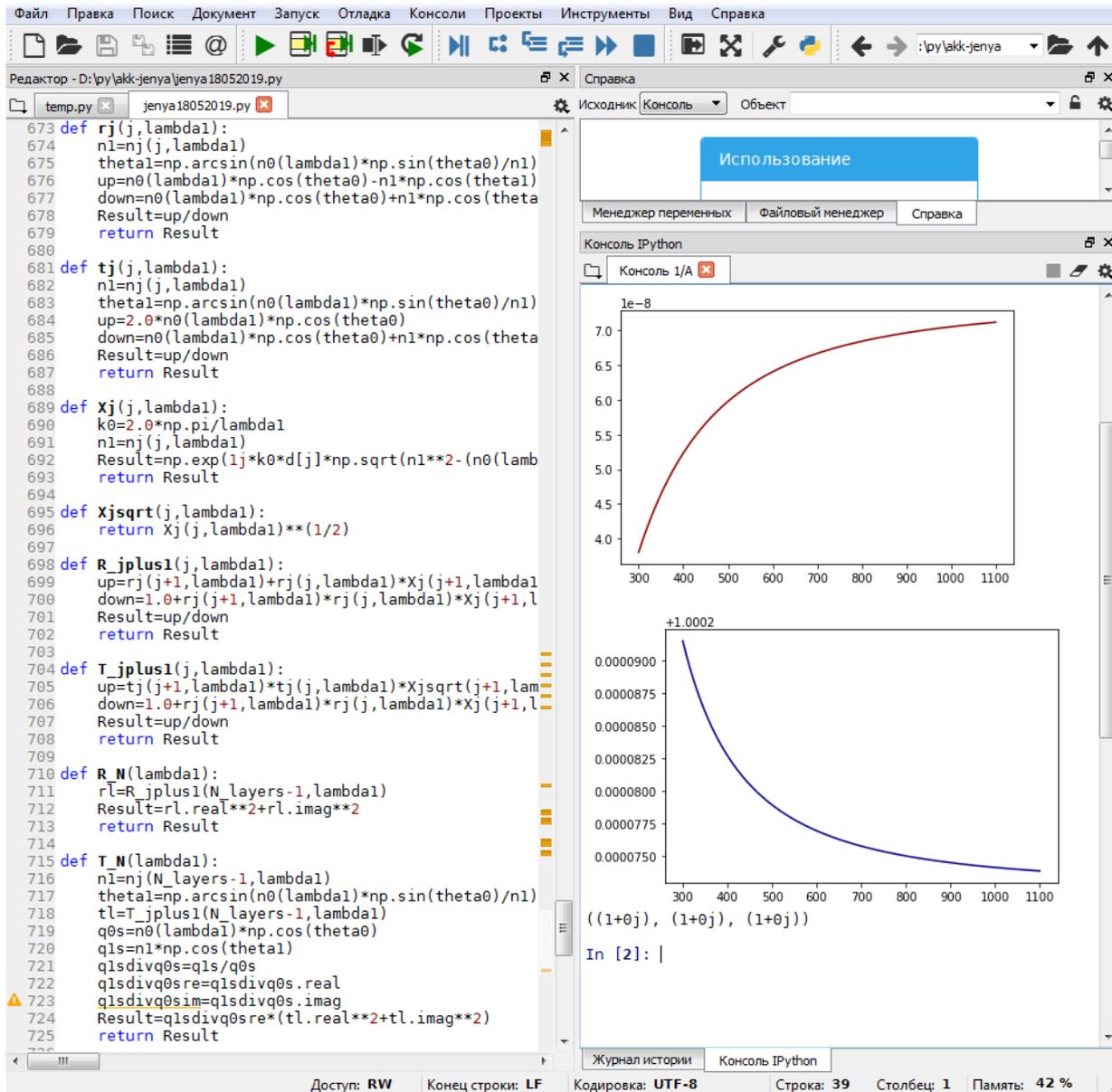


Рис. 2. Другая часть компьютерной программы на языке программирования Python для расчёта оптического отражения и пропускания ультратонких нанокompозитных плёнок.

На рис. 2 изображена часть компьютерной программы на языке программирования Python для расчёта оптического отражения и пропускания ультратонких нанокompозитных плёнок. Приведём результаты численных расчётов энергетических коэффициентов оптического отражения и пропускания ультратонких нанокompозитных плёнок, активированных наночастицами серебра. Нанокompозитные плёнки могут рассматриваться в приближении эффективной среды. Расчёт комплексной диэлектрической проницаемости неупорядоченных сред может быть сделан в рамках классических подходов, основанных на теориях гомогенизации Друде, Лорентц–Лоренца, Максвелл–Гарнетта, Оделевского, Бёттчере, Бергмана и др. Ясно, что универсальную форму для диэлектрической проницаемости  $\epsilon_{\text{eff}}$  среды получить затруднительно, так как диэлектрическая проницаемость зависит не только от состава неупорядоченной среды, но и от особенностей её структуры.

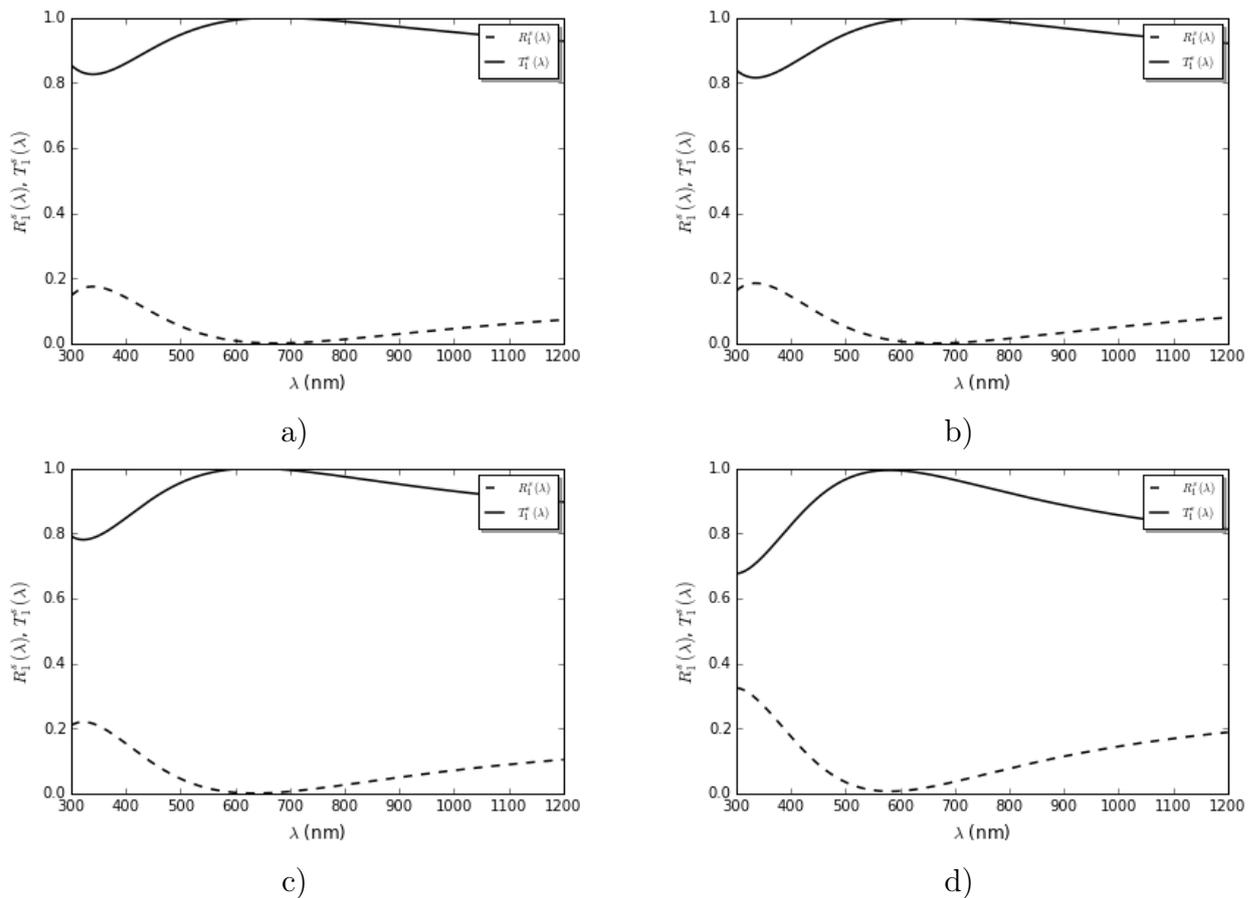


Рис. 3. Зависимость энергетического коэффициента отражения и коэффициента пропускания от длины волны оптического излучения для случая падения оптической волны из воздуха на ультратонкую нанокompозитную плёнку толщиной  $d_1 = 112$  нм из полиметилметакрилата с наночастицами серебра с радиусом  $a_1 = 4.0$  нм, фактором заполнения  $f_1 = 3\%$ , расположенную на подложке из нанокompозитной среды из  $\text{SiO}_2$  с наночастицами серебра с радиусом  $a_2 = 7.0$  нм, фактором заполнения  $f_2 = 5\%$  при угле падения излучения а)  $\theta_0 = 0^\circ$ , б)  $\theta_0 = 15^\circ$ , в)  $\theta_0 = 30^\circ$ , д)  $\theta_0 = 50^\circ$ .

На рис. 3 приведены результаты численных расчётов зависимости энергетического коэффициента отражения и коэффициента пропускания от длины волны оптического излучения для случая падения оптической волны из воздуха на ультратонкую нанокompозитную плёнку толщиной  $d_1 = 112$  нм из полиметилметакрилата с наночастицами серебра с радиусом  $a_1 = 4.0$  нм, фактором заполнения  $f_1 = 3\%$ , расположенную на подложке из нанокompозитной среды из  $\text{SiO}_2$  с наночастицами серебра с радиусом  $a_2 = 7.0$  нм, фактором заполнения  $f_2 = 5\%$ . Угол падения внешнего оптического излучения: а)  $\theta_0 = 0^\circ$ , б)  $\theta_0 = 15^\circ$ , в)  $\theta_0 = 30^\circ$ , д)  $\theta_0 = 50^\circ$ .

На рис. 4 приведены результаты численных расчётов зависимости энергетического коэффициента отражения и коэффициента пропускания от длины волны оптического излучения для случая падения оптической волны из воздуха на ультратонкую нанокompозитную плёнку толщиной  $d_1 = 112$  нм из полиметилметакрилата с наночастицами серебра с радиусом  $a_1 = 2.5$  нм, фактором заполнения  $f_1 = 2\%$ , расположенную на подложке из нанокompозитной среды из  $\text{SiO}_2$  с наночастицами серебра с радиусом  $a_2 = 5.5$  нм, фактором заполнения  $f_2 = 3\%$ . Угол падения внешнего оптического излучения: а)  $\theta_0 = 0^\circ$ , б)  $\theta_0 = 15^\circ$ , в)  $\theta_0 = 30^\circ$ , д)  $\theta_0 = 50^\circ$ .

На рис. 5 приведены результаты численных расчётов зависимости энергетического коэффициента отражения и коэффициента пропускания от длины волны оптического

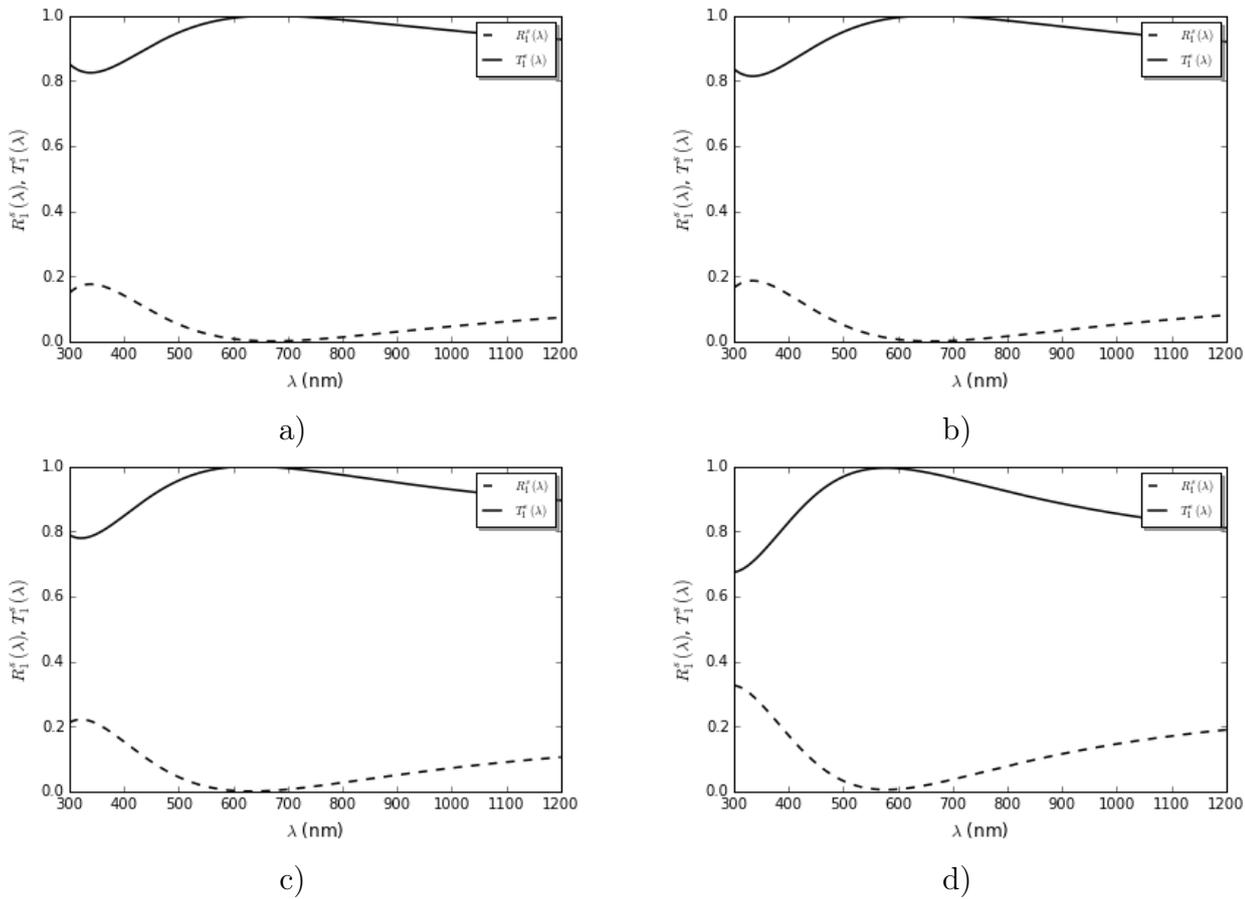


Рис. 4. Зависимость энергетического коэффициента отражения и коэффициента пропускания от длины волны оптического излучения для случая падения оптической волны из воздуха на ультратонкую нанокомпозитную плёнку толщиной  $d_1 = 112$  нм из полиметилметакрилата с наночастицами серебра с радиусом  $a_1 = 2.5$  нм, фактором заполнения  $f_1 = 2\%$ , расположенную на подложке из нанокомпозитной среды из  $\text{SiO}_2$  с наночастицами серебра с радиусом  $a_2 = 5.5$  нм, фактором заполнения  $f_2 = 3\%$  при угле падения излучения а)  $\theta_0 = 0^\circ$ , б)  $\theta_0 = 15^\circ$ , в)  $\theta_0 = 30^\circ$ , д)  $\theta_0 = 50^\circ$ .

излучения для случая падения оптической волны из воздуха на ультратонкую нанокомпозитную плёнку толщиной  $d_1 = 370$  нм из полиметилметакрилата с наночастицами серебра с радиусом  $a_1 = 4.0$  нм, фактором заполнения  $f_1 = 3\%$ , расположенную на подложке из нанокомпозитной среды из  $\text{SiO}_2$  с наночастицами серебра с радиусом  $a_2 = 7.0$  нм, фактором заполнения  $f_2 = 5\%$ . Угол падения внешнего оптического излучения: а)  $\theta_0 = 0^\circ$ , б)  $\theta_0 = 15^\circ$ , в)  $\theta_0 = 30^\circ$ , д)  $\theta_0 = 50^\circ$ .

На рис. 6 приведены результаты численных расчётов зависимости энергетического коэффициента отражения и коэффициента пропускания от длины волны оптического излучения для случая падения оптической волны из воздуха на ультратонкую двухслойную нанокомпозитную плёночную структуру. Толщина первой нанокомпозитной плёнки  $d_1 = 112$  нм из полиметилметакрилата с наночастицами серебра с радиусом  $a_1 = 4.0$  нм, фактором заполнения  $f_1 = 3\%$ . Толщина второй нанокомпозитной плёнки  $d_2 = 59$  нм из полиметилметакрилата с наночастицами серебра с радиусом  $a_2 = 7.0$  нм, фактором заполнения  $f_2 = 5\%$ . Подложка состоит из кристаллического кремния. Угол падения внешнего оптического излучения: а)  $\theta_0 = 0^\circ$ , б)  $\theta_0 = 15^\circ$ , в)  $\theta_0 = 30^\circ$ , д)  $\theta_0 = 50^\circ$ .

На рис. 7 приведены результаты численных расчётов зависимости энергетического коэффициента отражения и коэффициента пропускания от длины волны оптического

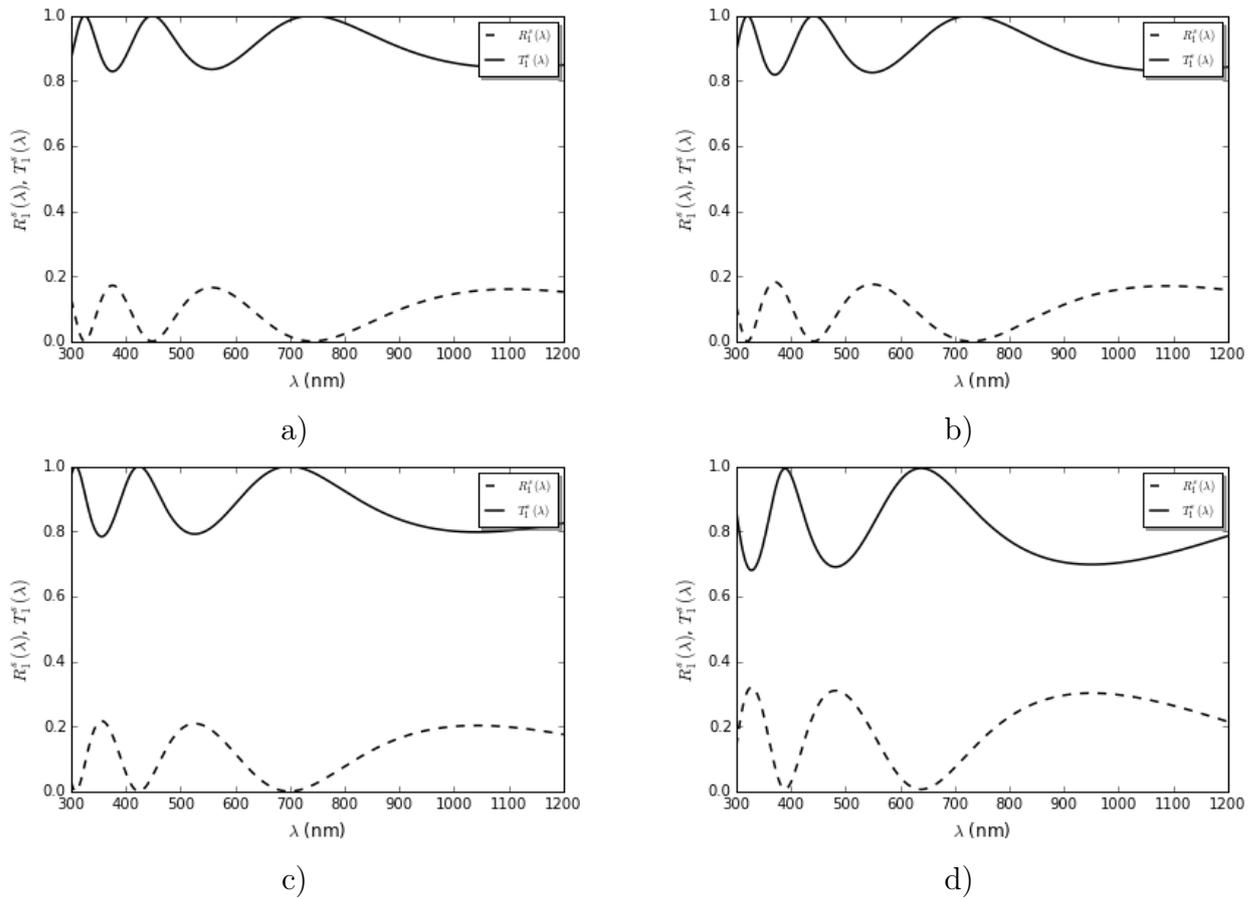


Рис. 5. Зависимость энергетического коэффициента отражения и коэффициента пропускания от длины волны оптического излучения для случая падения оптической волны из воздуха на ультратонкую нанокompозитную плёнку толщиной  $d_1 = 370$  нм из полиметилметакрилата с наночастицами серебра с радиусом  $a_1 = 4.0$  нм, фактором заполнения  $f_1 = 3\%$ , расположенную на подложке из нанокompозитной среды из  $\text{SiO}_2$  с наночастицами серебра с радиусом  $a_2 = 7.0$  нм, фактором заполнения  $f_2 = 5\%$  при угле падения излучения а)  $\theta_0 = 0^\circ$ , б)  $\theta_0 = 15^\circ$ , в)  $\theta_0 = 30^\circ$ , д)  $\theta_0 = 50^\circ$ .

излучения для случая падения оптической волны из воздуха на ультратонкую двухслойную нанокompозитную плёночную структуру. Толщина первой нанокompозитной плёнки  $d_1 = 112$  нм из полиметилметакрилата с наночастицами серебра с радиусом  $a_1 = 2.5$  нм, фактором заполнения  $f_1 = 2\%$ . Толщина второй нанокompозитной плёнки  $d_2 = 59$  нм из полиметилметакрилата с наночастицами серебра с радиусом  $a_2 = 5.5$  нм, фактором заполнения  $f_2 = 3\%$ . Подложка состоит из кристаллического кремния. Угол падения внешнего оптического излучения: а)  $\theta_0 = 0^\circ$ , б)  $\theta_0 = 15^\circ$ , в)  $\theta_0 = 30^\circ$ , д)  $\theta_0 = 50^\circ$ .

На рис. 8 приведены результаты численных расчётов зависимости энергетического коэффициента отражения и коэффициента пропускания от длины волны оптического излучения для случая падения оптической волны из воздуха на ультратонкую двухслойную нанокompозитную плёночную структуру. Толщина первой нанокompозитной плёнки  $d_1 = 370$  нм из полиметилметакрилата с наночастицами серебра с радиусом  $a_1 = 4.0$  нм, фактором заполнения  $f_1 = 3\%$ . Толщина второй нанокompозитной плёнки  $d_2 = 114$  нм из полиметилметакрилата с наночастицами серебра с радиусом  $a_2 = 7.0$  нм, фактором заполнения  $f_2 = 5\%$ . Подложка состоит из кристаллического кремния. Угол падения внешнего оптического излучения: а)  $\theta_0 = 0^\circ$ , б)  $\theta_0 = 15^\circ$ , в)  $\theta_0 = 30^\circ$ , д)  $\theta_0 = 50^\circ$ .

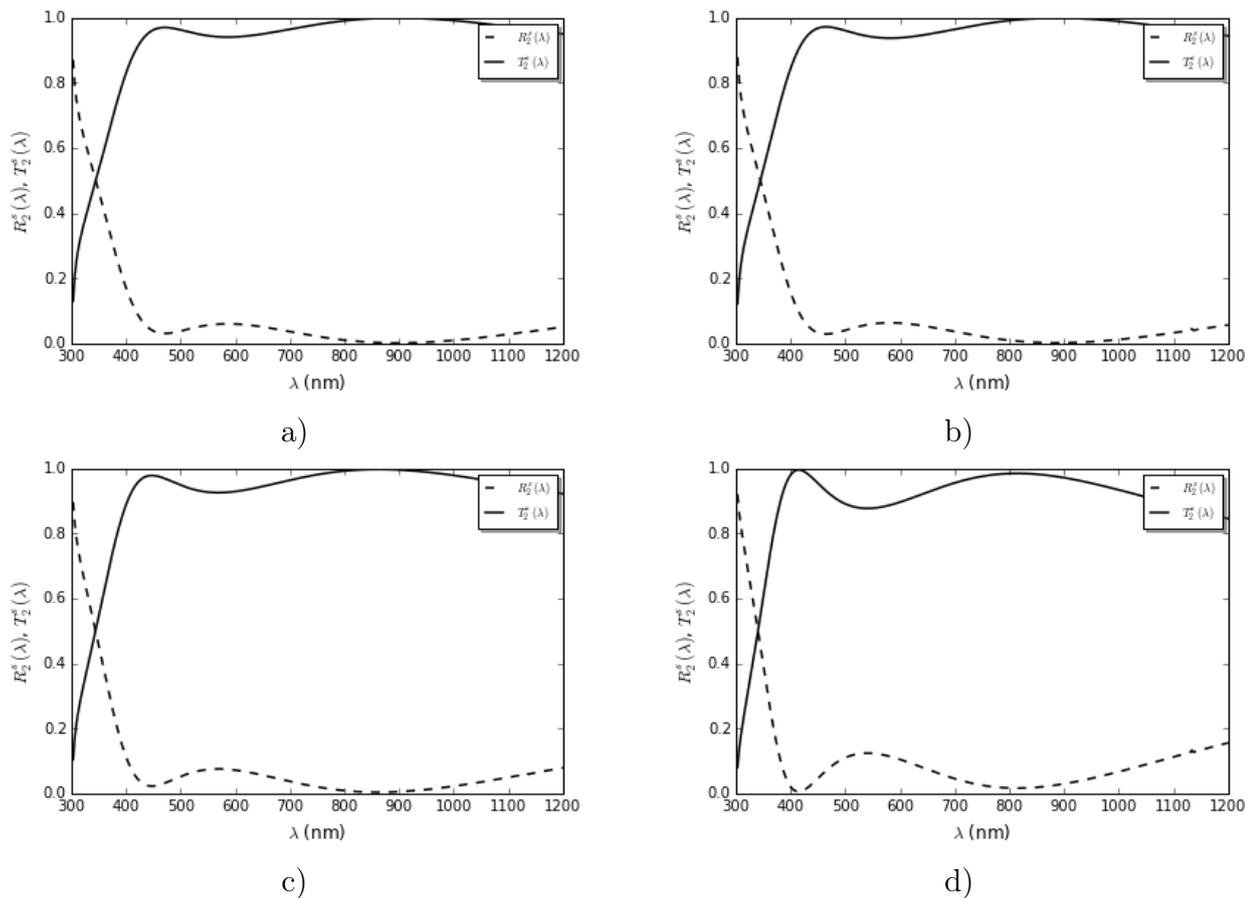


Рис. 6. Зависимость энергетического коэффициента отражения и коэффициента пропускания от длины волны оптического излучения для случая падения оптической волны из воздуха на ультратонкую двухслойную нанокompозитную плёночную структуру. Толщина первой нанокompозитной плёнки  $d_1 = 112$  нм из полиметилметакрилата с наночастицами серебра с радиусом  $a_1 = 4.0$  нм, фактором заполнения  $f_1 = 3\%$ . Толщина второй нанокompозитной плёнки  $d_2 = 59$  нм из полиметилметакрилата с наночастицами серебра с радиусом  $a_2 = 7.0$  нм, фактором заполнения  $f_2 = 5\%$ . Подложка состоит из кристаллического кремния. Рассматриваются углы падения излучения а)  $\theta_0 = 0^\circ$ , б)  $\theta_0 = 15^\circ$ , в)  $\theta_0 = 30^\circ$ , д)  $\theta_0 = 50^\circ$ .

На рис. 9 приведены результаты численных расчётов зависимости энергетического коэффициента отражения и коэффициента пропускания от длины волны оптического излучения для случая падения оптической волны из воздуха на двухслойную нанокompозитную плёночную структуру. Толщина первой нанокompозитной плёнки  $d_1 = 12$  мкм из полиметилметакрилата с наночастицами серебра с радиусом  $a_1 = 4.0$  нм, фактором заполнения  $f_1 = 3\%$ . Толщина второй нанокompозитной плёнки  $d_2 = 59$  мкм из полиметилметакрилата с наночастицами серебра с радиусом  $a_2 = 7.0$  нм, фактором заполнения  $f_2 = 5\%$ . Подложка состоит из кристаллического кремния. Угол падения внешнего оптического излучения: а)  $\theta_0 = 0^\circ$ , б)  $\theta_0 = 15^\circ$ , в)  $\theta_0 = 30^\circ$ , д)  $\theta_0 = 50^\circ$ . Из полученных графиков видно, что ультратонкие нанокompозитные плёнки обладают высоким пропусканием оптического излучения и имеют слабую угловую зависимость от угла падения оптического излучения. Экстраординарно высокое оптическое пропускание и слабая угловая зависимость от угла падения оптического излучения делает возможным использование нанокompозитных плёнок в качестве просветляющих покрытий.

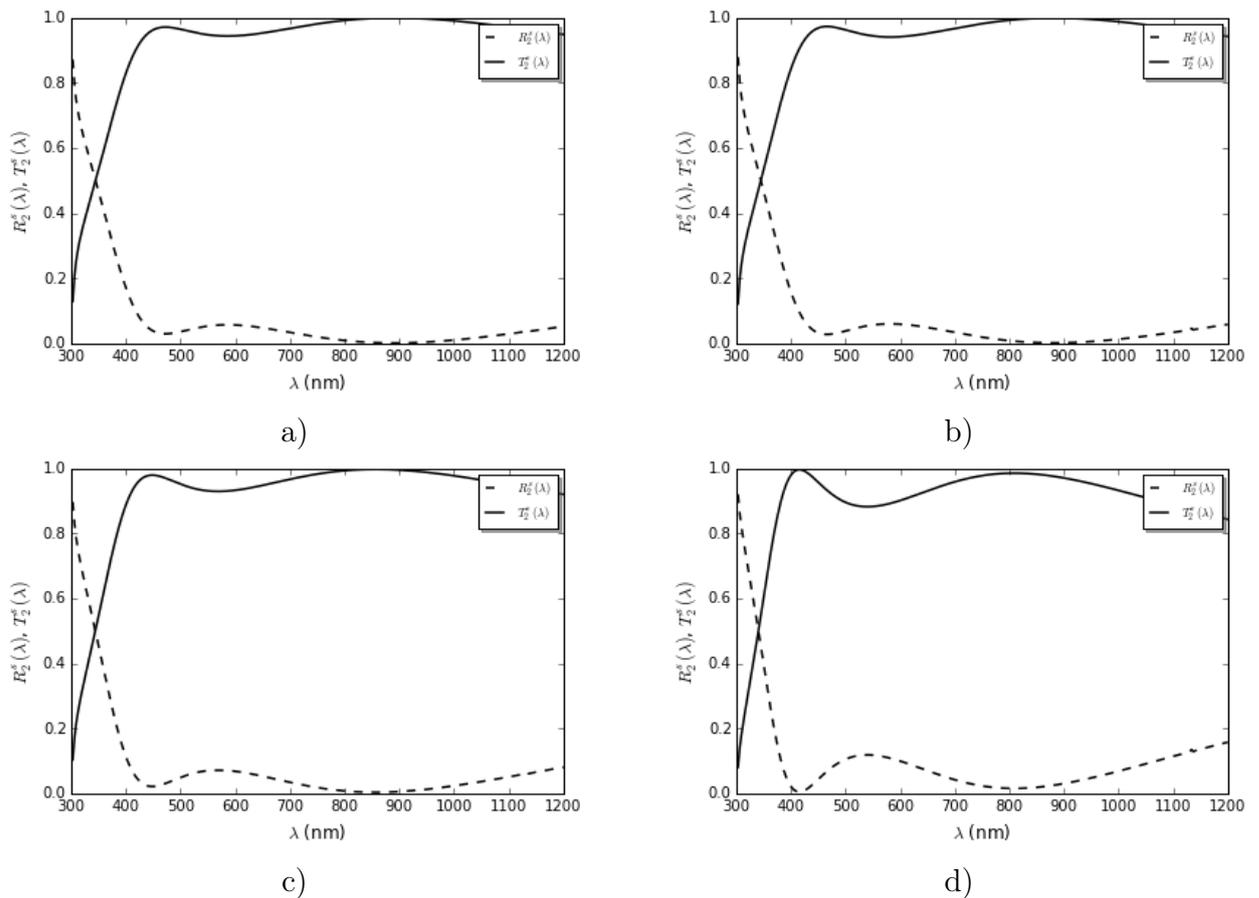


Рис. 7. Зависимость энергетического коэффициента отражения и коэффициента пропускания от длины волны оптического излучения для случая падения оптической волны из воздуха на ультратонкую двухслойную нанокompозитную плёночную структуру. Толщина первой нанокompозитной плёнки  $d_1 = 112$  нм из полиметилметакрилата с наночастицами серебра с радиусом  $a_1 = 2.5$  нм, фактором заполнения  $f_1 = 2\%$ . Толщина второй нанокompозитной плёнки  $d_2 = 59$  нм из полиметилметакрилата с наночастицами серебра с радиусом  $a_2 = 5.5$  нм, фактором заполнения  $f_2 = 3\%$ . Подложка состоит из кристаллического кремния. Рассматриваются углы падения излучения а)  $\theta_0 = 0^\circ$ , б)  $\theta_0 = 15^\circ$ , в)  $\theta_0 = 30^\circ$ , д)  $\theta_0 = 50^\circ$ .

## Заключение

В работе исследованы оптические характеристики ультратонких нанокompозитных плёнок. в приближении эффективной среды разработана модифицированная теоретическая модель для описания оптических процессов в ультратонких нанокompозитных плёнках, находящихся во внешнем поле оптического излучения. Разработанная модель позволяет адекватно описывать различные оптические процессы в ультратонких нанокompозитных плёнках и плёночных покрытиях, расположенных на различных подложках. Изменяя весовое содержание и размер металлических наночастиц, находящихся внутри ультратонких нанокompозитных плёнок, можно эффективно управлять значениями энергетических коэффициентов оптического отражения и пропускания ультратонких нанокompозитных плёнок, что может быть использовано для создания новых высокоэффективных наноструктурных покрытий для приборов и устройств оптоэлектроники. В работе проводились численные расчёты пропускательной и отражательной способностей ультратонких нанокompозитных плёнок, находящихся во внешнем поле оптического излучения.

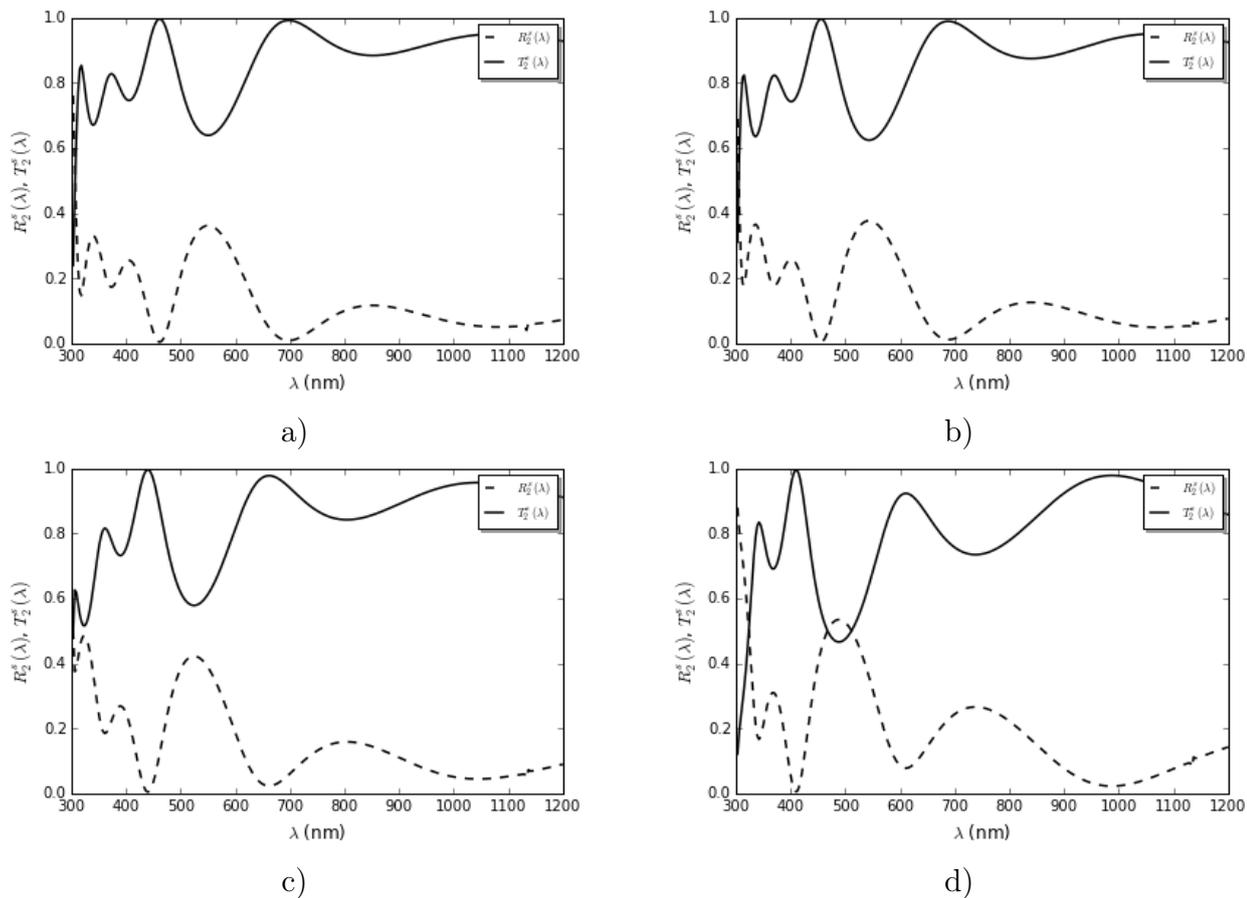


Рис. 8. Зависимость энергетического коэффициента отражения и коэффициента пропускания от длины волны оптического излучения для случая падения оптической волны из воздуха на ультратонкую двухслойную нанокompозитную плёночную структуру. Толщина первой нанокompозитной плёнки  $d_1 = 370$  нм из полиметилметакрилата с наночастицами серебра с радиусом  $a_1 = 4.0$  нм, фактором заполнения  $f_1 = 3\%$ . Толщина второй нанокompозитной плёнки  $d_2 = 114$  нм из полиметилметакрилата с наночастицами серебра с радиусом  $a_2 = 7.0$  нм, фактором заполнения  $f_2 = 5\%$ . Подложка состоит из кристаллического кремния. Рассматриваются углы падения излучения а)  $\theta_0 = 0^\circ$ , б)  $\theta_0 = 15^\circ$ , в)  $\theta_0 = 30^\circ$ , д)  $\theta_0 = 50^\circ$ .

Для вычисления оптических характеристик составлена компьютерная программа на языке программирования Python. Компьютерная программа позволяет строить графики зависимостей отражательной и пропускательной способностей от длины волны внешнего оптического излучения. При помощи компьютерной программы вычислены оптические характеристики оптического отражения и пропускания ультратонких нанокompозитных плёнок и плёночных покрытий, содержащих наночастицы серебра, при различных значениях параметрах системы включений из металлических наночастиц.

Показано, что можно управлять величиной пропускания оптического излучения путём изменения параметров ультратонких нанокompозитных плёнок. Оптическое пропускание ультратонких нанокompозитных плёнок обладает слабой угловой зависимостью.

Гипотеза исследования, заключающаяся в том, что если использовать теоретические модели оптических процессов в ультратонких плёнках, плёночных наносистемах из нанокompозитных материалов и результаты численных расчётов оптических характеристик ультратонких нанокompозитных плёнок, то можно прогнозировать оптические свойства приборов и устройств на основе плёночных наносистем из нанокompозитных материалов, подтверждена полностью.

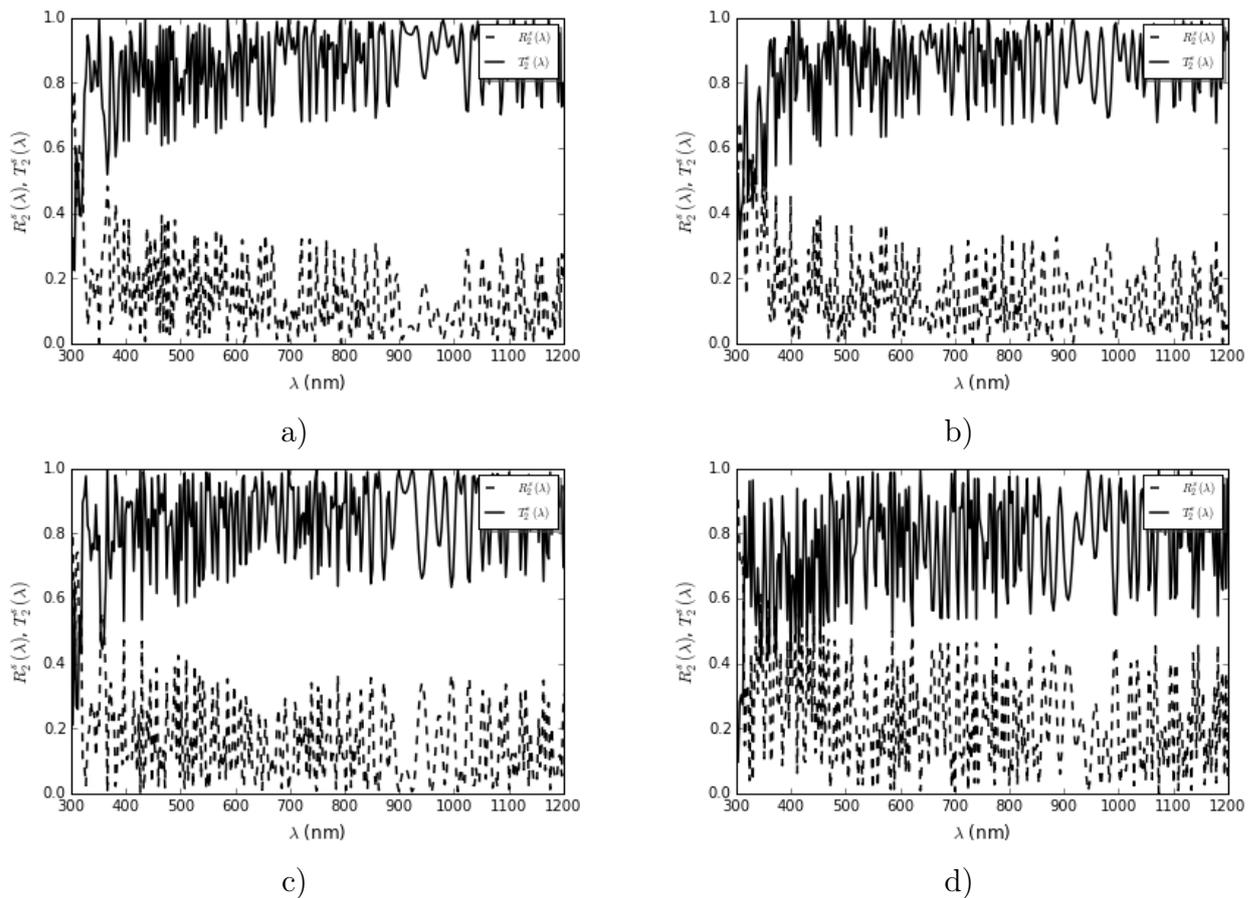


Рис. 9. Зависимость энергетического коэффициента отражения и коэффициента пропускания от длины волны оптического излучения для случая падения оптической волны из воздуха на ультратонкую двухслойную нанокompозитную плёночную структуру. Толщина первой нанокompозитной плёнки  $d_1 = 12$  мкм из полиметилметакрилата с наночастицами серебра с радиусом  $a_1 = 4.0$  нм, фактором заполнения  $f_1 = 3\%$ . Толщина второй нанокompозитной плёнки  $d_2 = 59$  мкм из полиметилметакрилата с наночастицами серебра с радиусом  $a_2 = 7.0$  нм, фактором заполнения  $f_2 = 5\%$ . Подложка состоит из кристаллического кремния. Рассматриваются углы падения излучения а)  $\theta_0 = 0^\circ$ , б)  $\theta_0 = 15^\circ$ , в)  $\theta_0 = 30^\circ$ , д)  $\theta_0 = 50^\circ$ .

Выводы по работе можно сформулировать следующим образом:

1. проведённый анализ работ по оптике ультратонких нанокompозитных покрытий показал актуальность исследования ультратонких нанокompозитных плёнок,
2. построена теоретическая модель оптических процессов в ультратонких нанокompозитных плёнках и плёночных наносистемах, позволяющая адекватно описывать различные оптические процессы в ультратонких нанокompозитных плёнках и плёночных наносистемах, расположенных на различных подложках,
3. компьютерная программа, которая была написана на языке программирования Python, позволяет вычислять оптические характеристики ультратонких нанокompозитных плёнок, строить графики зависимостей отражательной и пропускательной способностей от длины волны внешнего оптического излучения,
4. в результате численных расчётов оптических характеристик ультратонких нанокompозитных плёнок показано, что возможно управлять значением оптического пропускания ультратонкой нанокompозитной плёнки, изменяя состав ультратонкой нанокompозитной плёнки.

**Список использованных источников**

1. Langmuir-Blodgett films / J. Zasadzinski [et al.] // *Science*. — 1994. — mar. — Vol. 263, no. 5154. — P. 1726–1733. — URL: <https://doi.org/10.1126/science.8134836>.
2. Solidlike and liquidlike behavior in monolayers and multilayers of metal-bearing amphiphiles / S. Mukherjee [et al.] // *Physical Review E*. — 2011. — aug. — Vol. 84, no. 2. — URL: <https://doi.org/10.1103/physreve.84.021606>.
3. Alivisatos A. P. Perspectives on the Physical Chemistry of Semiconductor Nanocrystals // *The Journal of Physical Chemistry*. — 1996. — jan. — Vol. 100, no. 31. — P. 13226–13239. — URL: <https://doi.org/10.1021/jp9535506>.
4. Li H., Zhang J., Bubeck Ch. Surfactant induced orientation of non-centrosymmetric polyoxometalate clusters in Langmuir–Blodgett films // *Thin Solid Films*. — 2010. — oct. — Vol. 519, no. 1. — P. 417–422. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2010.07.103>.
5. Principles and applications of grazing incidence X-ray and neutron scattering from ordered molecular monolayers at the air-water interface / J. Als-Nielsen [et al.] // *Physics Reports*. — 1994. — oct. — Vol. 246, no. 5. — P. 251–313. — URL: [https://doi.org/10.1016/0370-1573\(94\)90046-9](https://doi.org/10.1016/0370-1573(94)90046-9).
6. X-ray and neutron scattering from rough surfaces / S. K. Sinha [et al.] // *Physical Review B*. — 1988. — aug. — Vol. 38, no. 4. — P. 2297–2311. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.38.2297>.
7. X-ray diffuse scattering study of static undulations in multilayer films of a liquid-crystalline polymer / R. E. Geer [et al.] // *Physical Review Letters*. — 1993. — aug. — Vol. 71, no. 9. — P. 1391–1394. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.71.1391>.
8. Geer R. E., Shashidhar R. Crossover from static to thermal layer undulations in finite-size liquid-crystalline films // *Physical Review E*. — 1995. — jan. — Vol. 51, no. 1. — P. R8–R11. — URL: <https://doi.org/10.1103/physreve.51.r8>.
9. Correlations in the interface structure of Langmuir-Blodgett films observed by x-ray scattering / V. Nitz [et al.] // *Physical Review B*. — 1996. — aug. — Vol. 54, no. 7. — P. 5038–5050. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.54.5038>.
10. Evidence of Self-Affine Rough Interfaces in a Langmuir-Blodgett Film from X-Ray Reflectometry / A. Gibaud [et al.] // *Physical Review Letters*. — 1995. — apr. — Vol. 74, no. 16. — P. 3205–3208. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.74.3205>.
11. Brus L. Electronic wave functions in semiconductor clusters: experiment and theory // *The Journal of Physical Chemistry*. — 1986. — jun. — Vol. 90, no. 12. — P. 2555–2560. — URL: <https://doi.org/10.1021/j100403a003>.
12. Kaganer V. M., Loginov E. B. Crystallization phase transitions and phase diagram of Langmuir monolayers // *Physical Review Letters*. — 1993. — oct. — Vol. 71, no. 16. — P. 2599–2602. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.71.2599>.
13. Kaganer V. M., Loginov E. B. Symmetry and phase transitions in Langmuir monolayers: The Landau theory // *Physical Review E*. — 1995. — mar. — Vol. 51, no. 3. — P. 2237–2249. — URL: <https://doi.org/10.1103/physreve.51.2237>.

14. Kaganer V. M., Möhwald H., Dutta P. Structure and phase transitions in Langmuir monolayers // *Reviews of Modern Physics*. — 1999. — apr. — Vol. 71, no. 3. — P. 779–819. — URL: <https://doi.org/10.1103/revmodphys.71.779>.
15. Aste T., Szeto K. Y., Tam W. Y. Statistical properties and shell analysis in random cellular structures // *Physical Review E*. — 1996. — nov. — Vol. 54, no. 5. — P. 5482–5492. — URL: <https://doi.org/10.1103/physreve.54.5482>.
16. X-ray-scattering study of capillary-wave fluctuations at a liquid surface / M. K. Sanyal [et al.] // *Physical Review Letters*. — 1991. — feb. — Vol. 66, no. 5. — P. 628–631. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.66.628>.
17. Daillant J, Alba M. High-resolution x-ray scattering measurements: I. Surfaces // *Reports on Progress in Physics*. — 2000. — sep. — Vol. 63, no. 10. — P. 1725–1777. — URL: <https://doi.org/10.1088/0034-4885/63/10/203>.
18. Dramatic enhancement of capillary wave fluctuations of a decorated water surface / A. Datta [et al.] // *Physical Review E*. — 2005. — apr. — Vol. 71, no. 4. — URL: <https://doi.org/10.1103/physreve.71.041604>.
19. Elasticity of two-dimensional crystalline monolayers of fatty acid salts at an air–water surface / J. Daillant [et al.] // *Soft Matter*. — 2009. — Vol. 5, no. 1. — P. 203–207. — URL: <https://doi.org/10.1039/b810134e>.
20. Schwartz D. K. Langmuir-Blodgett film structure // *Surface Science Reports*. — 1997. — jan. — Vol. 27, no. 7-8. — P. 245–334. — URL: [https://doi.org/10.1016/s0167-5729\(97\)00003-4](https://doi.org/10.1016/s0167-5729(97)00003-4).
21. Basu J. K., Sanyal M. K. Capillary Waves in Langmuir-Blodgett Interfaces and Formation of Confined CdS Layers // *Physical Review Letters*. — 1997. — dec. — Vol. 79, no. 23. — P. 4617–4620. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.79.4617>.
22. Basu J. K., Hazra S., Sanyal M. K. Growth Mechanism of Langmuir-Blodgett Films // *Physical Review Letters*. — 1999. — jun. — Vol. 82, no. 23. — P. 4675–4678. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.82.4675>.
23. Agarwal Vijendra K. Langmuir-Blodgett Films // *Physics Today*. — 1988. — jun. — Vol. 41, no. 6. — P. 40–46. — URL: <https://doi.org/10.1063/1.881121>.
24. Bubeck Christoph, Holtkamp Dieter. Optical and surface-analytical methods for the characterization of ultrathin organic films // *Advanced Materials*. — 1991. — jan. — Vol. 3, no. 1. — P. 32–38. — URL: <https://doi.org/10.1002/adma.19910030107>.
25. Blinov L. M. Langmuir films // *Uspekhi Fizicheskikh Nauk*. — 1988. — Vol. 155, no. 7. — P. 443–480. — URL: <https://doi.org/10.3367/ufnr.0155.198807c.0443>.
26. Raper Judy A., Amal Rose. Measurement of Aggregate Fractal Dimensions Using Static Light Scattering // *Particle & Particle Systems Characterization*. — 1993. — nov. — Vol. 10, no. 5. — P. 239–245. — URL: <https://doi.org/10.1002/ppsc.19930100505>.
27. Dynamic Light Scattering for the Characterization of Polydisperse Fractal Systems: I. Simulation of the Diffusional Behavior / Uwe Kätzel [et al.] // *Particle & Particle Systems Characterization*. — 2008. — feb. — Vol. 25, no. 1. — P. 9–18. — URL: <https://doi.org/10.1002/ppsc.200700004>.

28. Forbes Andrew. Structured Light from Lasers // Laser & Photonics Reviews. — 2019. — oct. — Vol. 13, no. 11. — P. 1900140. — URL: <https://doi.org/10.1002/lpor.201900140>.
29. Stemp W. J., Lerner H. J., Kristant E. H. Testing Area-Scale Fractal Complexity (Asfc) and Laser Scanning Confocal Microscopy (LSCM) to Document and Discriminate Microwear on Experimental Quartzite Scrapers // Archaeometry. — 2017. — oct. — Vol. 60, no. 4. — P. 660–677. — URL: <https://doi.org/10.1111/arcm.12335>.
30. Siakavara K. Enhanced fractal microstrip-antenna performance by using photonic-bandgap fractal ground plane // Microwave and Optical Technology Letters. — 2004. — Vol. 42, no. 5. — P. 397–402. — URL: <https://doi.org/10.1002/mop.20316>.
31. Born M., Wolf E. Principles of Optics. — Oxford : Pergamon Press, 1969. — 720 p.

**Сведения об авторах:**

**Константин Константинович Алтунин** — кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры физики и технических дисциплин ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», Ульяновск, Россия.

E-mail: kostya\_altunin@mail.ru

ORCID iD  0000-0002-0725-9416

Web of Science ResearcherID  I-5739-2014

SCOPUS ID  57201126207

**Евгения Александровна Купреянова** — студент факультета физико-математического и технологического образования ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», Ульяновск, Россия.

E-mail: kupreyanova.zhenechka@mail.ru

ORCID iD  0000-0002-9848-1273

Web of Science ResearcherID  AAZ-8152-2020

# Investigation of optical characteristics of ultrathin nanocomposite films using Python numerical computations

K. K. Altunin , E. A. Kupreyanova 

*Ulyanovsk State Pedagogical University, 432071, Ulyanovsk, Russia*

Submitted April 5, 2021

Resubmitted April 12, 2021

Published June 12, 2021

---

**Abstract.** The physical features of optical processes in ultrathin nanocomposite films and film nanosystems are considered. Numerical calculations of the transmittance and reflectivity of ultrathin nanocomposite films in an external field of optical radiation have been carried out. To calculate the optical characteristics, a computer program was compiled in the Python programming language, which allows plotting the dependences of the reflectance and transmittance on the wavelength of external optical radiation. The dependences of the energy coefficients of optical transmission and reflection of ultrathin nanocomposite films on the radiation wavelength in the optical wavelength range are obtained for various values of the parameters of ultrathin nanocomposite films. It is shown that it is possible to effectively control the optical transmission of optical radiation by changing the parameters of ultrathin nanocomposite films.

**Keywords:** nanocomposite film, ultrathin nanocomposite film, nanostructured coating, metal nanoparticles, silver nanoparticles, optical radiation, optical transmittance, optical reflection coefficient, antireflection optical coating, optical devices, nanosystem

PACS: 42.25.Bs

---

## References

1. Blinov L. M. Langmuir films // *Uspekhi Fizicheskikh Nauk.* — 1988. — Vol. 155, no. 7. — P. 443–480. — URL: <https://doi.org/10.3367/ufnr.0155.198807c.0443>.
2. Solidlike and liquidlike behavior in monolayers and multilayers of metal-bearing amphiphiles / S. Mukherjee [et al.] // *Physical Review E.* — 2011. — aug. — Vol. 84, no. 2. — URL: <https://doi.org/10.1103/physreve.84.021606>.
3. Kaganer V. M., Loginov E. B. Crystallization phase transitions and phase diagram of Langmuir monolayers // *Physical Review Letters.* — 1993. — oct. — Vol. 71, no. 16. — P. 2599–2602. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.71.2599>.
4. Kaganer V. M., Loginov E. B. Symmetry and phase transitions in Langmuir monolayers: The Landau theory // *Physical Review E.* — 1995. — mar. — Vol. 51, no. 3. — P. 2237–2249. — URL: <https://doi.org/10.1103/physreve.51.2237>.
5. Kaganer V. M., Möhwald H., Dutta P. Structure and phase transitions in Langmuir monolayers // *Reviews of Modern Physics.* — 1999. — apr. — Vol. 71, no. 3. — P. 779–819. — URL: <https://doi.org/10.1103/revmodphys.71.779>.

6. Aste T., Szeto K. Y., Tam W. Y. Statistical properties and shell analysis in random cellular structures // *Physical Review E*. — 1996. — nov. — Vol. 54, no. 5. — P. 5482–5492. — URL: <https://doi.org/10.1103/physreve.54.5482>.
7. X-ray-scattering study of capillary-wave fluctuations at a liquid surface / M. K. Sanyal [et al.] // *Physical Review Letters*. — 1991. — feb. — Vol. 66, no. 5. — P. 628–631. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.66.628>.
8. Daillant J, Alba M. High-resolution x-ray scattering measurements: I. Surfaces // *Reports on Progress in Physics*. — 2000. — sep. — Vol. 63, no. 10. — P. 1725–1777. — URL: <https://doi.org/10.1088/0034-4885/63/10/203>.
9. Dramatic enhancement of capillary wave fluctuations of a decorated water surface / A. Datta [et al.] // *Physical Review E*. — 2005. — apr. — Vol. 71, no. 4. — URL: <https://doi.org/10.1103/physreve.71.041604>.
10. Elasticity of two-dimensional crystalline monolayers of fatty acid salts at an air–water surface / J. Daillant [et al.] // *Soft Matter*. — 2009. — Vol. 5, no. 1. — P. 203–207. — URL: <https://doi.org/10.1039/b810134e>.
11. Schwartz D. K. Langmuir-Blodgett film structure // *Surface Science Reports*. — 1997. — jan. — Vol. 27, no. 7-8. — P. 245–334. — URL: [https://doi.org/10.1016/s0167-5729\(97\)00003-4](https://doi.org/10.1016/s0167-5729(97)00003-4).
12. Basu J. K., Sanyal M. K. Capillary Waves in Langmuir-Blodgett Interfaces and Formation of Confined CdS Layers // *Physical Review Letters*. — 1997. — dec. — Vol. 79, no. 23. — P. 4617–4620. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.79.4617>.
13. Basu J. K., Hazra S., Sanyal M. K. Growth Mechanism of Langmuir-Blodgett Films // *Physical Review Letters*. — 1999. — jun. — Vol. 82, no. 23. — P. 4675–4678. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.82.4675>.
14. Langmuir-Blodgett films / J. Zasadzinski [et al.] // *Science*. — 1994. — mar. — Vol. 263, no. 5154. — P. 1726–1733. — URL: <https://doi.org/10.1126/science.8134836>.
15. Alivisatos A. P. Perspectives on the Physical Chemistry of Semiconductor Nanocrystals // *The Journal of Physical Chemistry*. — 1996. — jan. — Vol. 100, no. 31. — P. 13226–13239. — URL: <https://doi.org/10.1021/jp9535506>.
16. Principles and applications of grazing incidence X-ray and neutron scattering from ordered molecular monolayers at the air-water interface / J. Als-Nielsen [et al.] // *Physics Reports*. — 1994. — oct. — Vol. 246, no. 5. — P. 251–313. — URL: [https://doi.org/10.1016/0370-1573\(94\)90046-9](https://doi.org/10.1016/0370-1573(94)90046-9).
17. X-ray and neutron scattering from rough surfaces / S. K. Sinha [et al.] // *Physical Review B*. — 1988. — aug. — Vol. 38, no. 4. — P. 2297–2311. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.38.2297>.
18. X-ray diffuse scattering study of static undulations in multilayer films of a liquid-crystalline polymer / R. E. Geer [et al.] // *Physical Review Letters*. — 1993. — aug. — Vol. 71, no. 9. — P. 1391–1394. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.71.1391>.

19. Geer R. E., Shashidhar R. Crossover from static to thermal layer undulations in finite-size liquid-crystalline films // *Physical Review E*. — 1995. — jan. — Vol. 51, no. 1. — P. R8–R11. — URL: <https://doi.org/10.1103/physreve.51.r8>.
20. Correlations in the interface structure of Langmuir-Blodgett films observed by x-ray scattering / V. Nitz [et al.] // *Physical Review B*. — 1996. — aug. — Vol. 54, no. 7. — P. 5038–5050. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.54.5038>.
21. Agarwal Vijendra K. Langmuir-Blodgett Films // *Physics Today*. — 1988. — jun. — Vol. 41, no. 6. — P. 40–46. — URL: <https://doi.org/10.1063/1.881121>.
22. Bubeck Christoph, Holtkamp Dieter. Optical and surface-analytical methods for the characterization of ultrathin organic films // *Advanced Materials*. — 1991. — jan. — Vol. 3, no. 1. — P. 32–38. — URL: <https://doi.org/10.1002/adma.19910030107>.
23. Li H., Zhang J., Bubeck Ch. Surfactant induced orientation of non-centrosymmetric polyoxometalate clusters in Langmuir-Blodgett films // *Thin Solid Films*. — 2010. — oct. — Vol. 519, no. 1. — P. 417–422. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2010.07.103>.
24. Evidence of Self-Affine Rough Interfaces in a Langmuir-Blodgett Film from X-Ray Reflectometry / A. Gibaud [et al.] // *Physical Review Letters*. — 1995. — apr. — Vol. 74, no. 16. — P. 3205–3208. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.74.3205>.
25. Brus L. Electronic wave functions in semiconductor clusters: experiment and theory // *The Journal of Physical Chemistry*. — 1986. — jun. — Vol. 90, no. 12. — P. 2555–2560. — URL: <https://doi.org/10.1021/j100403a003>.
26. Born M., Wolf E. *Principles of Optics*. — Oxford : Pergamon Press, 1969. — 720 p.
27. Shalaev V. M. *Nonlinear optics of random media*. — Springer Berlin Heidelberg, 2000. — URL: <http://dx.doi.org/10.1007/BFb0109599>.
28. Forbes Andrew. Structured Light from Lasers // *Laser & Photonics Reviews*. — 2019. — oct. — Vol. 13, no. 11. — P. 1900140. — URL: <https://doi.org/10.1002/lpor.201900140>.
29. Dynamic Light Scattering for the Characterization of Polydisperse Fractal Systems: I. Simulation of the Diffusional Behavior / Uwe Kätzel [et al.] // *Particle & Particle Systems Characterization*. — 2008. — feb. — Vol. 25, no. 1. — P. 9–18. — URL: <https://doi.org/10.1002/ppsc.200700004>.
30. Raper Judy A., Amal Rose. Measurement of Aggregate Fractal Dimensions Using Static Light Scattering // *Particle & Particle Systems Characterization*. — 1993. — nov. — Vol. 10, no. 5. — P. 239–245. — URL: <https://doi.org/10.1002/ppsc.19930100505>.
31. Stemp W. J., Lerner H. J., Kristant E. H. Testing Area-Scale Fractal Complexity (Asfc) and Laser Scanning Confocal Microscopy (LSCM) to Document and Discriminate Microwear on Experimental Quartzite Scrapers // *Archaeometry*. — 2017. — oct. — Vol. 60, no. 4. — P. 660–677. — URL: <https://doi.org/10.1111/arcm.12335>.

#### Information about authors:

**Konstantin Konstantinovich Altunin** – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Physics and Technical Disciplines of the Ulyanovsk State Pedagogical University, Ulyanovsk, Russia.

E-mail: kostya.altunin@mail.ru

ORCID iD  0000-0002-0725-9416

Web of Science ResearcherID  I-5739-2014

SCOPUS ID  57201126207

**Evgeniya Aleksandrovna Kupreyanova** — student of the Faculty of Physics, Mathematics and Technological Education of the Ulyanovsk State Pedagogical University, Ulyanovsk, Russia.

E-mail: kupreyanova.zhenechka@mail.ru

ORCID iD  0000-0002-9848-1273

Web of Science ResearcherID  AAZ-8152-2020

УДК 535.3  
ББК 22.343  
ГРНТИ 29.31.21  
ВАК 01.04.05

## Исследование оптических свойств графеновых наносистем с помощью численных вычислений на языке Python

К. К. Алтунин , Ю. А. Кучерова  <sup>1</sup>

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», 432071, Ульяновск, Россия

Поступила в редакцию 8 апреля 2021 года  
После переработки 12 апреля 2021 года  
Опубликована 12 июня 2021 года

---

**Аннотация.** Рассматриваются физические особенности оптических процессов в графеновых наносистемах. Проведены численные расчёты пропускательной и отражательной способностей графеновых наносистем, находящихся во внешнем поле оптического излучения. Для вычисления оптических характеристик графеновых наносистем составлена компьютерная программа на языке программирования Python, которая позволяет строить графики зависимостей отражательной и пропускательной способностей графеновых наносистем от длины волны внешнего оптического излучения. Получены зависимости энергетических коэффициентов оптического пропускания и отражения графеновых наносистем от длины волны излучения в оптическом диапазоне длин волн при различных значениях параметров наносистемы. Показано, что можно эффективно управлять величиной оптического пропускания оптического излучения через графеновую наносистему путём изменения параметров графеновых наносистем.

**Ключевые слова:** наноэлектроника, графен, графеновая наноэлектроника, нанокompозит, графеновый нанокompозит, графеновая наносистема, наночастица, монослой частиц, оптическое излучение, оптическое пропускание, оптическое отражение, оптическое покрытие, метод решёточных сумм

PACS: 42.25.Bs

---

## Введение

В настоящее время интенсивно развиваются нанотехнологии, позволяющие создавать приборы и устройства на основе графеновых наноматериалов. В связи с этим становится актуальной задача вычисления оптических характеристик графеновых наноматериалов, находящихся в поле непрерывного или импульсного оптического излучения.

Объектом исследования является графеновый нанокompозит.

Предметом исследования являются оптические процессы в графеновых нанокompозитах с монослоями наночастиц.

---

<sup>1</sup>E-mail: melneko@mail.ru

Целью работы является исследование оптических свойств графеновых наноматериалов и монослоёв наночастиц. В связи с интенсивным развитием графеновых материалов становится актуальной задача расчёта оптических характеристик и прогнозирования оптических свойств графеновых наноматериалов.

Задачи работы могут быть сформулированы следующим образом:

1. обзор и анализ научной литературы по графеновым наноматериалам,
2. создание теоретической модели графенового материала в поле оптического излучения,
3. проведение численных расчётов оптических характеристик графеновых нанокомпозитов и монослоёв наночастиц.

Гипотеза исследования состоит в том, что если выявить особенности оптических характеристик графеновых нанокомпозитов с монослоями наночастиц, то можно прогнозировать физические свойства приборов оптоэлектроники на основе графеновых нанокомпозитов с монослоями наночастиц.

В качестве методов исследования используются теоретические методы нанооптики, современные численные методы, методы программирования физических задач в оптике нанокомпозитов. В качестве материалов исследования выбраны различные конфигурации графеновых нанокомпозитов и монослоёв наночастиц.

## Обзор научных работ по графеновым нанокомпозитам

Графен является двумерным слоем из атомов углерода, размещенных в решётке. Графен, новый класс двумерной углеродной наноструктуры, привлекает огромное внимание как экспериментальных, так и теоретических научных кругов в последние годы. Графен стал захватывающим новым наноматериалом углерода со многими новыми свойствами[1,2].

Благодаря привлекательным свойствам оптоэлектронных устройств на основе графена, таким как гибкость, ударопрочность и прозрачность, многочисленные исследования были посвящены материалам на основе графена с целью улучшения их оптоэлектронных свойств. Графен обладает замечательными электронными, термическими и механическими свойствами [3, 4]. Эта комбинация свойств делает графен потенциально идеальным кандидатом для образования полимер/графеновых нанокомпозитов с улучшенными механическими свойствами и электрической проводимостью. Графен является не только строительным блоком фуллеренов, углеродных нанотрубок и графита, он также обладает интересными свойствами, которые вызвали поток активности в последние несколько лет. Графен, двумерная углеродная структура, обладающая замечательными электронными и механическими свойствами, имеет большой потенциал в области материаловедения как для фундаментальных исследований, так и для технологических применений [5–8]. Эта уникальная наноструктура имеет большие перспективы для потенциальных применений во многих технологических областях, таких как наноэлектроника, датчики, нанокомпозиты, батареи, суперконденсаторы и накопители водорода. Однако отсутствие эффективного подхода к производству обрабатываемых графеновых листов в больших количествах было основным препятствием для использования большинства предлагаемых применений.

Слои графена характеризуются хорошей химической стабильностью, высокой проводимостью и большой удельной поверхностью, что делает их привлекательными системами для изучения электрокаталитического эффекта углеродных материалов [9, 10].

Был значительный интерес к использованию графена или его свернутого аналога, углеродной нанотрубки, в качестве усиления в композитах с металлической матрицей

[11–13] из-за присущей им стабильности при повышенных температурах, высокой жёсткости и прочности, а также превосходных электрических и теплопроводных свойств при помещении в металлические матрицы. Такое уникальное сочетание свойств основано на эффективном связывании вдоль границы раздела графен-металл [14, 15].

Наноккомпозиты состоят из нанонаполнителей и матриц, что позволяет создавать новые материалы с желаемыми свойствами как нанонаполнителей, так и матриц. Формирование перколяционной сети нанонаполнителей в матрицах имеет решающее значение для практической реализации уникальных свойств. Некоторые нанонаполнители, такие как углеродные нанотрубки и графеновые нанолитики, настолько гибки, что становятся волнистыми или смятыми [16].

Наноккомпозиты с наполнителями с высоким аспектным отношением привлекают огромное внимание благодаря превосходным физическим свойствам композита по сравнению с исходной матрицей. Наноккомпозиты с функционализированным графеном в качестве наполнителей не дали ожидаемой высокой теплопроводности из-за высокого межфазного термического сопротивления между функциональными группами и хлопьями графена. В работе [17] сообщается о надёжном и эффективном методе, который позволяет определить конфигурацию функциональных возможностей для улучшения теплопроводности. Метод сочетает в себе линеаризацию межатомных взаимодействий, расчёт и оптимизацию теплопроводности с использованием глобализованного и ограниченного алгоритма Нелдера-Мида.

Стремление к материалам с высокой теплопроводностью привело к созданию в матрице с более низкой теплопроводностью наноккомпозитов, включающих макромолекулярные материалы с превосходной теплопроводностью, такие как углеродные нанотрубки и графеновые наноленты. Чтобы минимизировать тепловое сопротивление поверхности раздела, жесткие, встроенные материалы могут быть химически функционализированы с различными боковыми цепями. В статье [18] сообщается об эффективном теоретическом методе, который использует нормальные моды для расчёта теплопроводности таких систем, и показывается, как коэффициент участия этих мод можно использовать для оценки различных вариантов функционализации. Этот метод использован для изучения того, насколько эффективно различные алкановые цепи улучшают тепловой поток через нанопласт графена.

В статье [5] обобщены результаты недавних фотоэмиссионных исследований, охватывающих различные аспекты, такие как рост эпитаксиального графена и многослойного графена, электронные и структурные свойства границы раздела с подложкой SiC и электронная структура эпитаксиальных слоёв графена.

За последние несколько десятилетий произошли драматические достижения в области электроники, которые нашли применение в вычислительной технике, связи, автоматике и других приложениях, которые затрагивают практически каждый аспект нашей жизни. В значительной степени эти достижения стали результатом непрерывной миниатюризации микроэлектронных устройств, в частности кремниевых транзисторов, что привело к созданию более плотных, быстрых и более энергоэффективных схем. Однако очевидно, что миниатюризация и повышение производительности этих устройств не могут продолжаться вечно; ряд ограничений в фундаментальном научном, а также технологическом характере накладывают ограничения на конечный размер и производительность кремниевых устройств. Полупроводниковая технология прошла долгий путь, создавая устройства всё меньшего размера. Но в конце концов, когда транзисторы приближаются к размеру молекул, квантовые эффекты становятся важными. Реализация приближающихся ограничений вдохновила всемирные усилия по разработке технологий альтернативных устройств. Некоторые подходы включают отход от традиционной электроники на основе транспорта электронов: например, разработка устройств

на основе спина. Другой подход, на котором сосредоточивается внимание, поддерживает принципы работы используемых в настоящее время устройств, в первую очередь полевого транзистора, но заменяет ключевой компонент устройства, проводящий канал, углеродными наноматериалами, такими как одномерные углеродные нанотрубки или двумерные графеновые слои, которые имеют превосходные электрические свойства. Кроме того, полупроводниковые углеродные нанотрубки представляют собой материалы с прямой запрещённой зоной, которые представляют собой идеальную систему для изучения оптики и оптоэлектроники в одном измерении и изучения возможности использования как электроники, так и оптоэлектронных технологий на одном материале [6]. Было разработано несколько методов синтеза графена, таких как метод скотча [1, 19], эпитаксиальный рост на пластине SiC [20], и химическое расслоение [21–23]. Первые два метода непригодны для получения графеновых слоёв с большой площадью поверхности в больших количествах при низких затратах.

Уникальное электронное свойство листов графена [1, 19, 24] обеспечивает потенциальное применение для синтеза нанокompозитов [25] и изготовления различных микроэлектронных устройств, таких как полевые транзисторы [26], сверхчувствительные датчики [27], и электромеханические резонаторы [28].

Помимо захватывающих электронных свойств, таких как дробный квантовый эффект Холла при комнатной температуре, графен обладает рядом других особенностей, представляющих большой практический интерес. Многие физические измерения на графене были сделаны с образцами, приготовленными методом скотча, и недавно были предприняты некоторые попытки синтезировать образцы графена в более широком масштабе. Такой синтез обычно даёт образцы, которые не являются однослойными и содержат несколько графеновых слоёв [29–31].

В статье [32] сообщается о межфазной прочности на сдвиг графена на чистых и окисленных металлических и металлических поверхностях Ti и Al, используя расчёты теории функционала плотности. Результаты показывают значительные изменения в свойствах связи графен-металл в присутствии оксидной фазы. В частности, сильно хемосорбированная граница раздела между графеном и чистым Ti резко ослаблена образованием оксидно-металлической фазы, в то время как слабо поглощающая граница раздела между графеном и чистым Al значительно усиливается за счёт образования оксида металла. Эти эффекты окисления могут быть в некоторой степени модулированы наличием вакансий или дефектов Стоун-Уэльса, которые увеличивают связывающие взаимодействия более слабых границ раздела графен-металл. Эти драматические изменения межфазных свойств при окислении поверхности объясняют результаты недавних экспериментов по извлечению углеродных нанотрубок из нанокompозитов с металлической матрицей Al и Ti.

Используя молекулярно-динамическое моделирование и моделирование графеновых слоёв в органической матрице, можно продемонстрировать, что тепловое сопротивление поверхности, определенное методом тепловой релаксации, примерно на порядок больше, чем определенное из метода прямого моделирования теплообмена через границу раздела матрица-графен-матрица. В статье [33] даётся объяснение этой разницы на основе спектрального анализа частотно-зависимой колебательной температуры. Метод релаксации имитирует экспериментальные лазерные измерения межфазного теплового сопротивления на основе лазера, а метод прямого моделирования предоставляет информацию, необходимую для прогнозирования и понимания теплопроводности нанокompозитов.

Гетерогенный фотокатализ с использованием полупроводников и возобновляемой солнечной энергии считается одним из наиболее перспективных процессов, позволяющих смягчить и даже разрешить как мировые кризисы энергоснабжения, так и загряз-

нения окружающей среды. За последние несколько лет было сделано много обнадеживающих достижений в области исследований полупроводниковых фотокатализаторов на основе графена. Среди них наноконпозиты CdS/графен привлекли большое внимание как важный вид фотокатализатора в химической и материаловедении благодаря своей превосходной фотокаталитической активности и фотостабильности при облучении в видимом свете. В работе [34] рассматривается механизм улучшения фотокаталитических характеристик композитных фотокатализаторов CdS/графен и систематическое обобщение последних достижений в области разработки и синтеза наноконпозитов CdS/графен. Эти наноконпозиты перспективны для большого разнообразия применений в фотокаталитических полях в видимом свете, включая искусственные фотосинтетические системы (фотокаталитическое производство водорода и снижение содержания CO<sub>2</sub>), восстановление окружающей среды и органический фотосинтез. Специальное внимание уделяется фотокаталитическому образованию водорода и фотодеградации загрязняющих веществ на наноконпозитных фотокатализаторах CdS/графен. Кроме того, обсуждаются перспективы материалов на основе CdS/графена, включая различные остающиеся проблемы для крупномасштабных применений, определяя перспективные области для соответствующих исследований в этой области.

В работе [35] сообщается о том, что синтезированы прозрачные и химически модифицированные графеновые наноконпозитные плёнки.

Микроструктура, тепловые и электрические свойства графеновых наноконпозитных плёнок толщиной около 100 мкм с УФ-отверждением в зависимости от содержания графена исследованы в статье [36].

В статье [37] исследован наноконпозитный материал сера/графен, который получен путём включения серы в графеновые каркасы посредством процесса плавления.

В работе [38] пенополистирол (PS)/функционализированные графеновые наноконпозитные пены были приготовлены с использованием сверхкритического диоксида углерода.

В статье [39] исследовано влияние функционализации циклогексилдиамина на поверхность графена посредством реакции диазония на кинетику отверждения, а также морфологические, механические, термические и физические свойства пены наноконпозита натуральный каучук/графен.

Кроме того, полимерные наноконпозитные пены привлекают все большее внимание как научных, так и промышленных кругов [4]. Сочетание функциональных нанонаполнителей и технологии вспенивания сверхкритической жидкости имеет высокий потенциал для создания нового класса материалов, которые являются легкими, высокопрочными и многофункциональными.

В работе [40] описана изготовленная серия огнестойких наноконпозитных пенопластов мочевины-формальдегид/графен-силан на основе промышленного продукта графена с использованием полимеризации и вспенивания на водной основе.

Как графен, атомарно тонкий двумерный кристалл, исследует третье пространственное измерение, изгибаясь при сжатии, ещё не понятно. Знание прочности на изгиб графена, нагрузки, при которой он трансформируется из плоской в изогнутую форму, является ключом к обеспечению механической стабильности наноэлектронных и наноконпозитных устройств на основе графена. В статье [41] устанавливается с помощью теоретического анализа из первых принципов, что графен обладает внутренней жёсткостью против выпучивания, и это проявляется в слабо линейном компоненте в дисперсии изгибного акустического режима графена, который считается квадратичным.

В работе [42] сообщается об аэрозольном синтезе и оптических характеристиках наноконпозитных плёнок ZnO / неокисленный графен с высокой оптической прозрачностью ( $T > 85\%$  на видимых длинах волн).

В статье [43] было изучено релаксационное поведение полиимида и его нанокомпозита, содержащего 10 мас.% графена, с использованием динамического механического спектрометра.

В работе [44] описано использование специально изготовленной сборочной конструкции плёнки, которая состоит из микрофлюидной камеры, позволяющей самосборке на основе электростатического заряда противоположно заряженных растворов полимеров, образующих гидрогелевое волокно и, в конечном итоге, нанокомпозитную волокнистую гидрогелевую плёнку. Плёнка повторяет однонаправленную иерархическую волокнистую структуру наряду с проводящими свойствами. Исследуемые объекты обладают высокой проводимостью и подвижностью носителей заряда графена для создания наноструктурных плёнок графенового нанокомпозита из волокнистого гидрогеля.

Графен широко исследовался в качестве материалов электродов суперконденсаторов благодаря его уникальным характеристикам двумерной наноструктуры, включая высокую теоретическую удельную поверхность, высокую проводимость, хорошую стабильность, широкое потенциальное окно и превосходную механическую гибкость.

В работе [45] рассмотрены свойства графен-полипирролового нанокомпозита, выступающего в качестве идеального электроактивного материала для высокоэффективных суперконденсаторов. Высокая плотность энергии, долговечность и гибкость суперконденсаторов срочно необходимы для следующего поколения носимых и портативных электронных устройств [46]. В работе [47] продемонстрировано тестированием производительности функционального композиционного материала в суперконденсаторах, что присутствие наночастиц  $Fe_2O_3$  оказывает положительное влияние на активную площадь поверхности углеродного аэрогеля и, следовательно, на ёмкость материала.

В статье [48] сообщается о простом методе синтеза нанокомпозита серебро – полипиррол/графен в качестве эффективных электродных материалов для применения суперконденсатора.

В работе [49] был синтезирован и охарактеризован магнитно-сульфоновый графеновый нанокомпозит ( $G-SO_3H/Fe_3O_4$ ) с помощью методов сканирующей электронной микроскопии, инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье и рентгеновской дифракции.

В работе [50] получают полианилино-функционализированный восстановленный оксид графена путём межфазной полимеризации, а затем вертикально ориентированные полианилино-графеновые нанокомпозиты.

В статье [51] рассматривается недавний прогресс в области синтеза и изготовления графеновых нанокомпозитных материалов для применения в различных системах накопления энергии.

## Теория оптических свойств графеновых наноматериалов

Рассмотрим теоретическую модель для оптического отражения и пропускания монослоя металлических наночастиц на поверхности полубесконечной среды. Приведём описание процесса оптического отражения и пропускания монослоя сферических наночастиц, расположенных на поверхности полубесконечной подстилающей среды. Основная система уравнений для нахождения амплитудных коэффициентов отражения и пропускания от монослоя металлических наночастиц, расположенных на поверхности подстилающей среды, имеет вид [52, 53]:

$$r_{01}^s = E_{01}^s N_1 \alpha_1 B_1^s - c_{01}^s t_{01}^s, \quad (1)$$

$$a_{01}^s t_{01}^s = E_0^s + E_{01}^s N_1 \alpha_1 C_1^s, \quad (2)$$

$$E_{01}^s = \frac{E_0^s - c_{01}^s t_{01}^s}{1 - (a_{T1} + A_1^s) N_1 \alpha_1}, \quad (3)$$

где введены френелевские коэффициенты

$$c_{01}^s = \frac{1 \sin(\theta_0 - \theta_1)}{2 \cos \theta_0 \sin \theta_1}, \quad (4)$$

$$a_{01}^s = \frac{1 \sin(\theta_0 + \theta_1)}{2 \cos \theta_0 \sin \theta_1}, \quad (5)$$

где  $\theta_0$  – угол падения внешней оптической волны,  $\theta_1$  – угол преломления внешней оптической волны, который может быть найден из обобщённого закона преломления

$$\frac{\sin \theta_0}{\sin \theta_1} = \frac{n_1}{n_0}. \quad (6)$$

Выражая из уравнения (6) угол преломления  $\theta_1$ , получим

$$\theta_1 = \arcsin \left( \frac{n_0 \sin \theta_0}{n_1} \right). \quad (7)$$

Решим систему уравнений (1)-(3).

$$r_{01}^s = \frac{(E_0^s - c_{01}^s t_{01}^s) N_1 \alpha_1 B_1^s}{1 - (a_{T1} + A_1^s) N_1 \alpha_1} - c_{01}^s t_{01}^s, \quad (8)$$

$$a_{01}^s t_{01}^s = E_0^s + \frac{N_1 \alpha_1 C_1^s (E_0^s - c_{01}^s t_{01}^s)}{1 - (a_{T1} + A_1^s) N_1 \alpha_1}, \quad (9)$$

$$a_{01}^s t_{01}^s = E_0^s + \frac{N_1 \alpha_1 C_1^s E_0^s}{1 - (a_{T1} + A_1^s) N_1 \alpha_1} - \frac{N_1 \alpha_1 C_1^s c_{01}^s t_{01}^s}{1 - (a_{T1} + A_1^s) N_1 \alpha_1}, \quad (10)$$

получим уравнение для нахождения амплитудного коэффициента пропускания  $t_{01}^s$

$$t_{01}^s \left( a_{01}^s + \frac{N_1 \alpha_1 C_1^s c_{01}^s}{1 - (a_{T1} + A_1^s) N_1 \alpha_1} \right) = E_0^s \left( 1 + \frac{N_1 \alpha_1 C_1^s}{1 - (a_{T1} + A_1^s) N_1 \alpha_1} \right), \quad (11)$$

из которого находим

$$t_{01}^s = E_0^s \frac{\left( 1 + \frac{N_1 \alpha_1 C_1^s}{1 - (a_{T1} + A_1^s) N_1 \alpha_1} \right)}{\left( a_{01}^s + \frac{N_1 \alpha_1 C_1^s c_{01}^s}{1 - (a_{T1} + A_1^s) N_1 \alpha_1} \right)}. \quad (12)$$

Энергетический коэффициент отражения оптической волны от монослоя сферических наночастиц найдём по формуле

$$R_{01}^s = \left| \frac{r_{01}^s}{E_0^s} \right|^2. \quad (13)$$

Опишем процесс вычисления решёточных сумм для монослоя из металлических наночастиц сферической формы. Выражение решёточной суммы для точки наблюдения внутри монослоя наночастиц имеет вид [53]:

$$A_1^s = \frac{4\pi}{3} a^3 \sum_j \exp(ik_0 |\mathbf{r} - \mathbf{r}_j|) \exp(i\mathbf{q} \cdot \mathbf{r}_j) \times \\ \times \left\{ \left( \frac{3}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_j|^5} - \frac{3ik_0}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_j|^4} - \frac{k_0^2}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_j|^3} \right) (y - y_j)^2 - \right. \\ \left. - \left( \frac{1}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_j|^3} - \frac{ik_0}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_j|^2} - \frac{k_0^2}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_j|} \right) \right\}, \quad (14)$$

где  $k_0 = \omega/c$  – волновое число оптической волны в вакууме.

Вектор поляризации подстилающей среды  $\mathbf{P}(\mathbf{r}) = (\tilde{n}^2 - 1)k_0^2\mathbf{Q}(\mathbf{r})$ , где  $\tilde{n}$  – показатель преломления среды,  $\mathbf{Q}(\mathbf{r})$  – функция координат, удовлетворяющая уравнению Гельмгольца

$$\nabla^2\mathbf{Q} + \tilde{n}^2k_0^2\mathbf{Q} = 0 \quad (15)$$

и условию поперечности  $\nabla \cdot \mathbf{Q} = 0$ . Применение теоремы Грина позволяет преобразовать объёмный интеграл по координатам в подстилающей среде к следующему поверхностному интегралу:

$$\mathbf{I}_\Sigma = -2\pi \frac{\sin(\theta_0 - \theta_1)}{\cos\theta_0 \sin\theta_1} \mathbf{Q}_0 \exp(ik_0\mathbf{r} \cdot \mathbf{s}) . \quad (16)$$

Тогда амплитуда  $s$ -поляризованной отражённой волны может быть определена из следующего равенства

$$r_{01}^s = E_{01}^s N_1 \alpha_1 B_1^s - c_{01}^s t_{01}^s . \quad (17)$$

Выражение решёточной суммы для точки наблюдения вне монослоя наночастиц имеет вид:

$$B_1^s = \frac{4\pi}{3} a^3 \exp(-ik_0 z) \sum_j \exp(i\mathbf{q} \cdot \mathbf{r}_j) \times \\ \times \left\{ \left( \frac{3}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_j|^5} - \frac{3ik_0}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_j|^4} - \frac{k_0^2}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_j|^3} \right) (y - y_j)^2 - \right. \\ \left. - \left( \frac{1}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_j|^3} - \frac{ik_0}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_j|^2} - \frac{k_0^2}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_j|} \right) \right\} \exp(ik_0|\mathbf{r} - \mathbf{r}_j|) . \quad (18)$$

Эффективная поляризуемость валентных электронов в сферических наночастицах определяется выражением

$$\alpha_{1\text{eff}} = \frac{\alpha_1}{1 - (a_T + A_1^s) N_1 \alpha_1} . \quad (19)$$

Запишем уравнения для нахождения амплитудного коэффициента пропускания монослоя сферических наночастиц в виде

$$a_{01}^s t_{01}^s = E_0^s + E_{01}^s N_1 \alpha_1 C_1^s , \quad (20)$$

где коэффициент  $a_{01}^s$  находится по формуле

$$a_{01}^s = \frac{1 \sin(\theta_0 + \theta_1)}{2 \cos\theta_0 \sin\theta_1} . \quad (21)$$

Выражая из уравнения (20) амплитудный коэффициент пропускания монослоя сферических наночастиц, получим

$$t_{01}^s = E_0^s \frac{1 + N_1 \alpha_{1\text{eff}} C_1^s}{a_{01}^s + c_{01}^s N_1 \alpha_{1\text{eff}} C_1^s} . \quad (22)$$

Энергетический коэффициент пропускания оптической волны через монослой сферических наночастиц найдём по формуле

$$T_{01}^s = \frac{q_1^s}{q_0^s} \left| \frac{t_{01}^s}{E_0^s} \right|^2 , \quad (23)$$

где  $q_1^s = n_1 \cos\theta_1$ ,  $q_0^s = n_0 \cos\theta_0$ .

Опишем процесс вычисления решёточных сумм методом Лоренца для монослоя металлических наночастиц сферической формы на поверхности полубесконечной среды. Вычислим решёточные суммы для монослоя металлических наночастиц сферической формы на поверхности полубесконечной среды, используя метод Лоренца. Согласно методу Лоренца наночастицы, находящиеся вблизи точки наблюдения, считаются распределёнными дискретно, а более далёкие наночастицы считаются распределёнными непрерывно. Влияние далёких наночастиц может быть учтено путём перехода к интегрированию. Рассмотрим случай, когда точка наблюдения находится вне наночастицы. Учитывая, что функция, описывающее поле диполей, является периодической с периодом решётки, она может быть разложена в ряд Фурье по векторам обратной решётки. Запишем следующее равенство

$$\mathbf{B} = \frac{4\pi}{3} a^3 \exp(-ik_0 z) \sum_j [\nabla [\nabla, \mathbf{n}_0]] \exp(i\mathbf{q} \cdot \mathbf{r}) G(|\mathbf{r} - \mathbf{r}_j|) = \sum_{p,q=-\infty}^{\infty} \mathbf{A}_{pq}(\mathbf{r}) \exp(i\mathbf{q} \cdot \mathbf{r}), \quad (24)$$

где  $\mathbf{n}_0 = \mathbf{E}_0 / |\mathbf{E}_0|$ , функция Грина

$$G(|\mathbf{r} - \mathbf{r}_j|) = \frac{\exp(ik_0 |\mathbf{r} - \mathbf{r}_j|)}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_j|}, \quad (25)$$

$$\mathbf{A}_{pq}(\mathbf{r}) = -\frac{4\pi}{3} a^3 \exp(-ik_0 z) \frac{2\pi i}{|[\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2]|} \times \times [\mathbf{k}_{pq} [\mathbf{k}_{pq}, \mathbf{n}_0]] \frac{\exp[i(\mathbf{k}_{pq} - \mathbf{q}) \cdot \mathbf{r}]}{\kappa_{pq}}. \quad (26)$$

Здесь введены обозначения

$$\mathbf{k}_{pq} = \begin{cases} \left( \mathbf{q} + \mathbf{g}_{pq}^{\parallel}, \kappa_{pq} \right) & z > 2a, \\ \left( \mathbf{q} + \mathbf{g}_{pq}^{\parallel}, -\kappa_{pq} \right) & z < 0, \end{cases} \quad (27)$$

$$\kappa_{pq} = \sqrt{k_0^2 - \left( \mathbf{q} + \mathbf{g}_{pq}^{\parallel} \right)^2}, \quad (28)$$

$$\mathbf{g}_{pq}^{\parallel} = p\mathbf{g}_1 + q\mathbf{g}_2. \quad (29)$$

Векторы обратной решётки равны

$$\mathbf{g}_1 = 2\pi \frac{[\mathbf{a}_2, \mathbf{n}]}{|[\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2]|}, \quad (30)$$

$$\mathbf{g}_2 = 2\pi \frac{[\mathbf{n}, \mathbf{a}_1]}{|[\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2]|}, \quad (31)$$

где  $\mathbf{a}_1 = (1, 0, 0)$ ,  $\mathbf{a}_2 = (\alpha, \beta, 0)$  – векторы трансляции прямой решётки, выбранные из соображения минимальности их длины, а вектор  $\mathbf{n} = (0, 0, 1)$  перпендикулярен поверхности монослоя.  $y$ -составляющая вектора  $\mathbf{B}$ , имеющего вид (24), совпадает с  $B_1^s$ .

Вычислим решёточную сумму (14) для точек наблюдения, расположенных внутри монослоя наночастиц. Следуя методу Эвальда [52], запишем следующее выражение при  $z = 0$ :

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}_i) = \frac{4\pi}{3} a^3 \sum_j [\nabla[\nabla, \mathbf{n}_0]] \exp(i\mathbf{q} \cdot \mathbf{r}_j) G(|\mathbf{r} - \mathbf{r}_j|) = \frac{4\pi}{3} a^3 \hat{f}(\mathbf{k}_0) \mathbf{n}_0 \exp(i\mathbf{q} \cdot \mathbf{r}_j), \quad (32)$$

где  $\mathbf{r}_j$  – радиус-вектор точки наблюдения, находящейся в центре  $i$ -ой наночастицы. Суммирование проводится по всем слагаемым, кроме  $i$ -го слагаемого. Вектор  $\mathbf{A}$  имеет  $y$ -компоненту, совпадающую с  $A_1^s$ .

Тензор  $\hat{f}$  является симметричным с компонентами  $f_{xz}, f_{zx}, f_{yz}$ , равными нулю. Он имеет следующий вид:

$$f^{\mu\nu}(\mathbf{k}_0) = c^{\mu\nu} - \frac{2}{3} i k_0^3 \left( \operatorname{erfc}\left(\frac{i k_0}{2F}\right) - 1 \right) \delta^{\mu\nu} + \frac{4F}{3\sqrt{\pi}} (k_0^2 - F^2) \exp\left(\frac{k_0^2}{4F^2}\right) \delta^{\mu\nu}. \quad (33)$$

Здесь содержится дополнительный интеграл вероятностей ( $\operatorname{erfc}$ ), который быстро стремится к нулю при больших значениях аргумента,

$$c^{\mu\nu} = \frac{i\pi}{|[\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2]|} \sum_{p,q} \left[ \frac{k_0^2 \delta^{\mu\nu} - k_{pq\mu} k_{pq\nu}}{k_{pq}} \operatorname{erfc}\left(-\frac{i k_{pq}}{2F}\right) \left(1 + (-1)^{\delta^{\mu z}} (-1)^{\delta^{\nu z}}\right) + \delta^{\mu z} \delta^{\nu z} \frac{i4F}{\sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{k_{pq}^2}{4F^2}\right) \right] + \frac{1}{2} \sum_{n,m} \frac{\exp(i\mathbf{k}_0 \cdot \mathbf{a}_{nm})}{a_{nm}^3} \times \left\{ \Gamma_{nm}^{(1)} [\delta^{\mu\nu} \Gamma_{nm}^{(2)} + \mathbf{a}_{nm}^\mu \cdot \mathbf{a}_{nm}^\nu \Gamma_{nm}^{(3)}] + \Gamma_{nm}^{(4)} [-\delta^{\mu\nu} \mathbf{a}_{nm} + \mathbf{a}_{nm}^\mu \cdot \mathbf{a}_{nm}^\nu \Gamma_{nm}^{(5)}] + c.c. \right\}, \quad (34)$$

$\mu, \nu = x, y, z$ ;  $\mathbf{a}_{nm} = n\mathbf{a}_1 + m\mathbf{a}_2$ ,  $a_{nm} = |\mathbf{a}_{nm}|$ ;  $n, m$  – целые числа.

Коэффициенты находятся по формулам

$$\Gamma_{nm}^{(1)} = \exp(-i k_0 a_{nm}) \operatorname{erfc}\left(a_{nm} F - \frac{i k_0}{2F}\right), \quad (35)$$

$$\Gamma_{nm}^{(2)} = -1 - i k_0 a_{nm} + k_0^2 a_{nm}^2, \quad (36)$$

$$\Gamma_{nm}^{(3)} = -k_0^2 + \frac{3i k_0}{a_{nm}} + \frac{3}{a_{nm}^2}, \quad (37)$$

$$\Gamma_{nm}^{(4)} = \frac{2F}{\sqrt{\pi}} \exp\left(-F^2 a_{nm}^2 + \frac{k_0^2}{4F^2}\right), \quad (38)$$

$$\Gamma_{nm}^{(5)} = \frac{3}{a_{nm}} + 2F^2 a_{nm}, \quad (39)$$

$$F = \sqrt{\frac{\pi}{|[\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2]|}}. \quad (40)$$

Численное исследование оптических свойств графеновых нанокomпозитов с монослоями наночастиц строиться на основе решения задачи об отражении и пропускании оптической волны монослоем наночастиц на подложке.

## Результаты численных расчётов коэффициентов оптического отражения и пропускания

Приведём описание результатов разработки компьютерной программы для расчёта оптического отражения и пропускания монослоя. В работе разработана компьютерная программа для расчёта оптического отражения и пропускания монослоя наночастиц, находящихся в диэлектрической матрице. Компьютерная программа на языке программирования Python состоит из блока подключения необходимых библиотек расширений для численных расчётов и построения графиков, блока описания функций зависимости рассчитываемых величин от длины волны излучения и процедур построения графиков. Затем из интерактивной оболочки разработки компьютерной программы на языке программирования Python разработки можно записать графики функциональных зависимостей оптического отражения и пропускания монослоя наночастиц или графенового нанокompозита в файл.

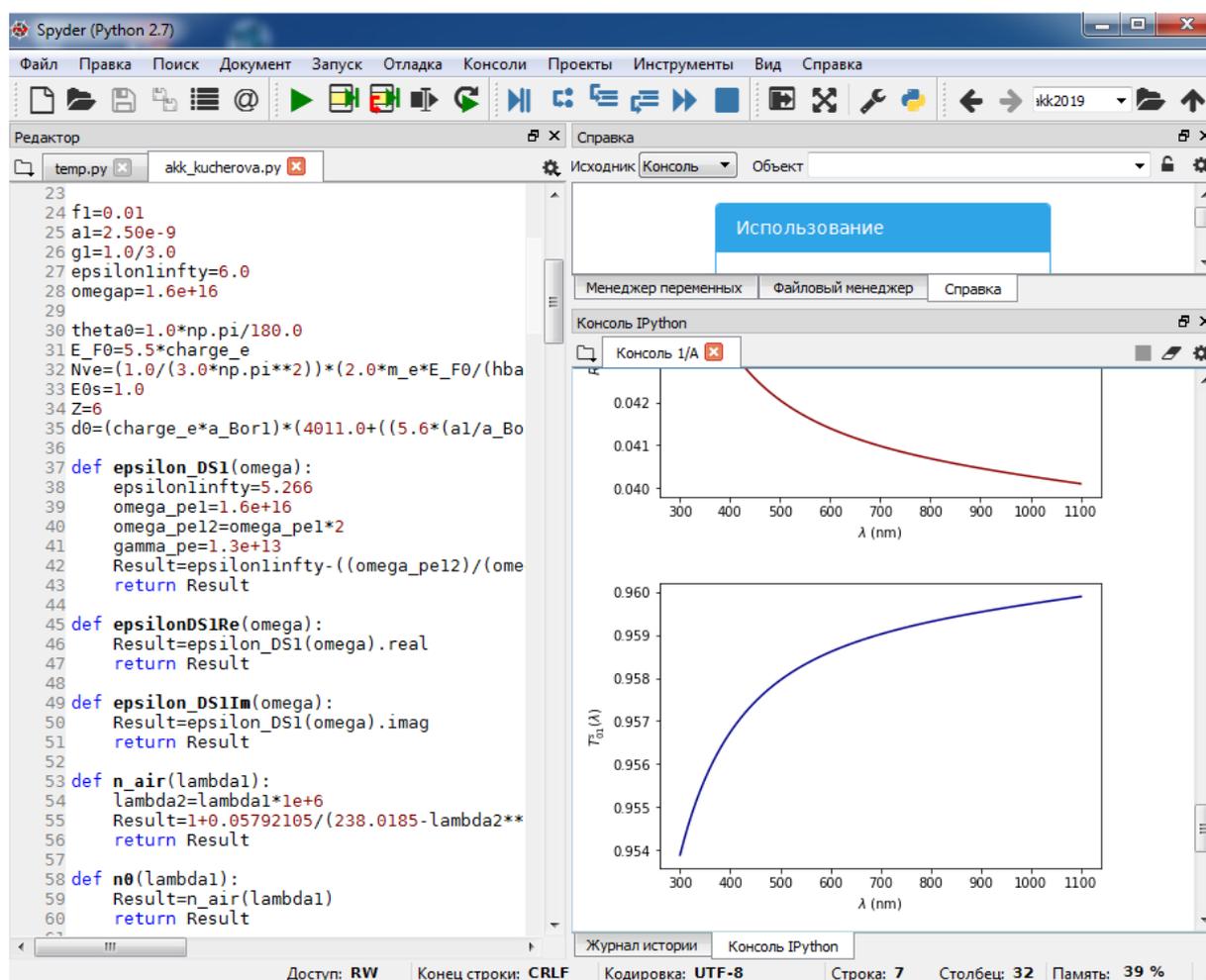


Рис. 1. Первая часть программы на языке программирования Python для расчёта оптического отражения и пропускания монослоя наночастиц.

На рис. 1 изображена первая часть программы на языке программирования Python для расчёта оптического отражения и пропускания монослоя наночастиц, расположенного на поверхности полубесконечной среды.

Численные расчёты оптических характеристик графеновых нанокompозитов и монослоёв наночастиц проводятся на основе решения задачи об отражении и пропускании оптической волны монослоя наночастиц, расположенных на поверхности полубесконечной подстилающей среды.

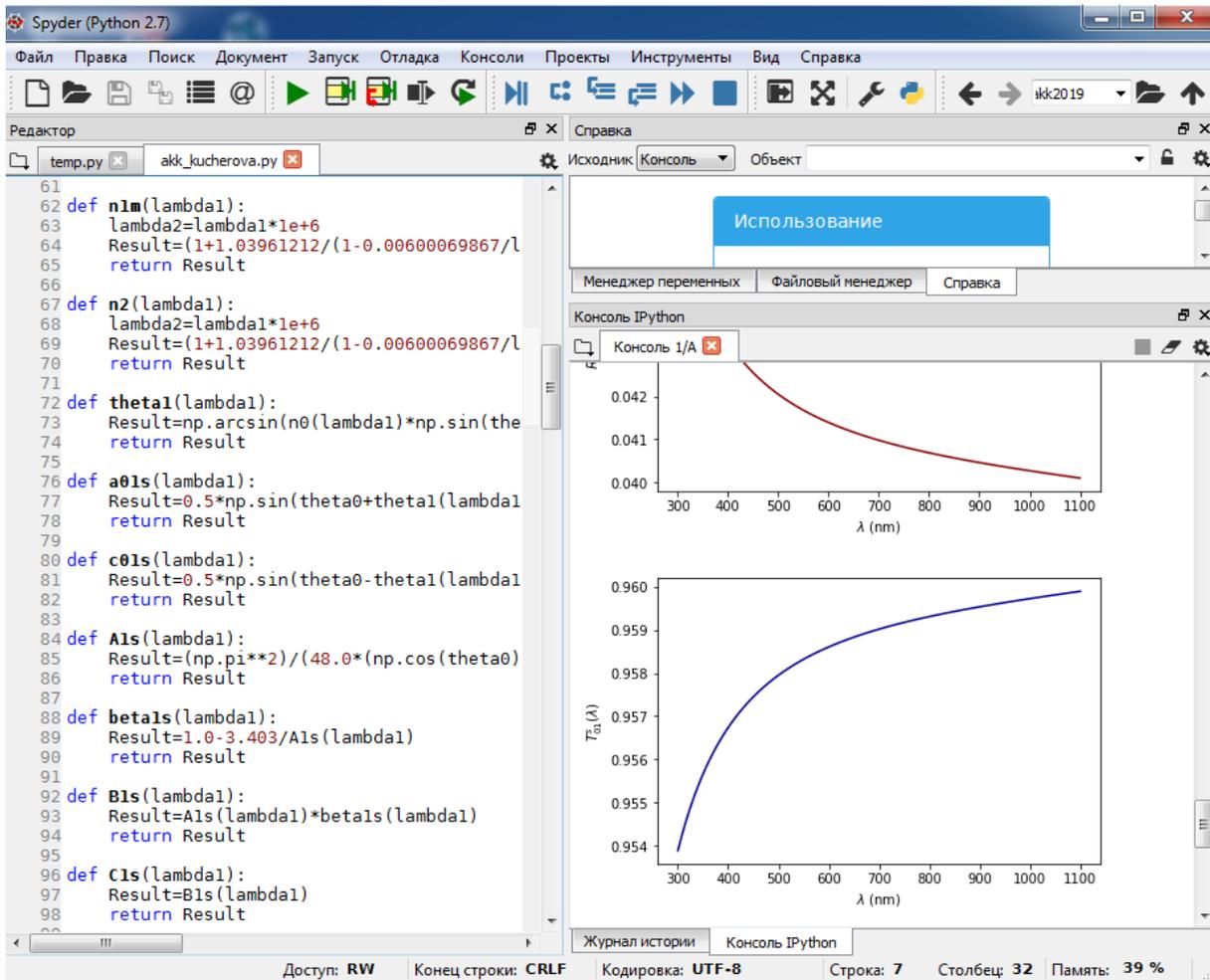


Рис. 2. Вторая часть компьютерной программы на языке программирования Python для расчёта оптического отражения и пропускания монослоя наночастиц.

На рис. 2 изображена вторая часть компьютерной программы на языке программирования Python для расчёта оптического отражения и пропускания монослоя наночастиц. На рис. 3 изображена третья часть компьютерной программы на языке программирования Python для расчёта оптического отражения и пропускания монослоя наночастиц, позволяющая строить графики зависимости оптического отражения и пропускания монослоя наночастиц в диэлектрической матрице из стекла в составе графенового нанокompозита. Затем можно либо записать графики в файл из программы, либо скопировать в графический файл из интерактивной оболочки языка Python.

Приведём результаты численных расчётов эффективного показателя преломления монослоя сферических наночастиц в случае малого заполнения. Компьютерная программа на языке программирования Python позволяет производить расчёты зависимости действительной и мнимой частей эффективного показателя преломления монослоя наночастиц от длины волны внешнего оптического излучения. Приведём результаты численных расчётов эффективного показателя преломления монослоя сферических наночастиц в случае малого заполнения наночастицами графенового нанокompозита.

На рис. 4 изображена зависимость действительной части эффективного показателя преломления монослоя наночастиц с радиусом  $a_1 = 2.5$  нм и фактором заполнения  $f_1 = 2\%$  в матрице из стекла от длины волны внешнего излучения в диапазоне длин волн излучения от 300 до 1100 нм.

На рис. 5 изображена зависимость мнимой части эффективного показателя преломления монослоя наночастиц с радиусом  $a_1 = 2.5$  нм и фактором заполнения  $f_1 = 2\%$  в

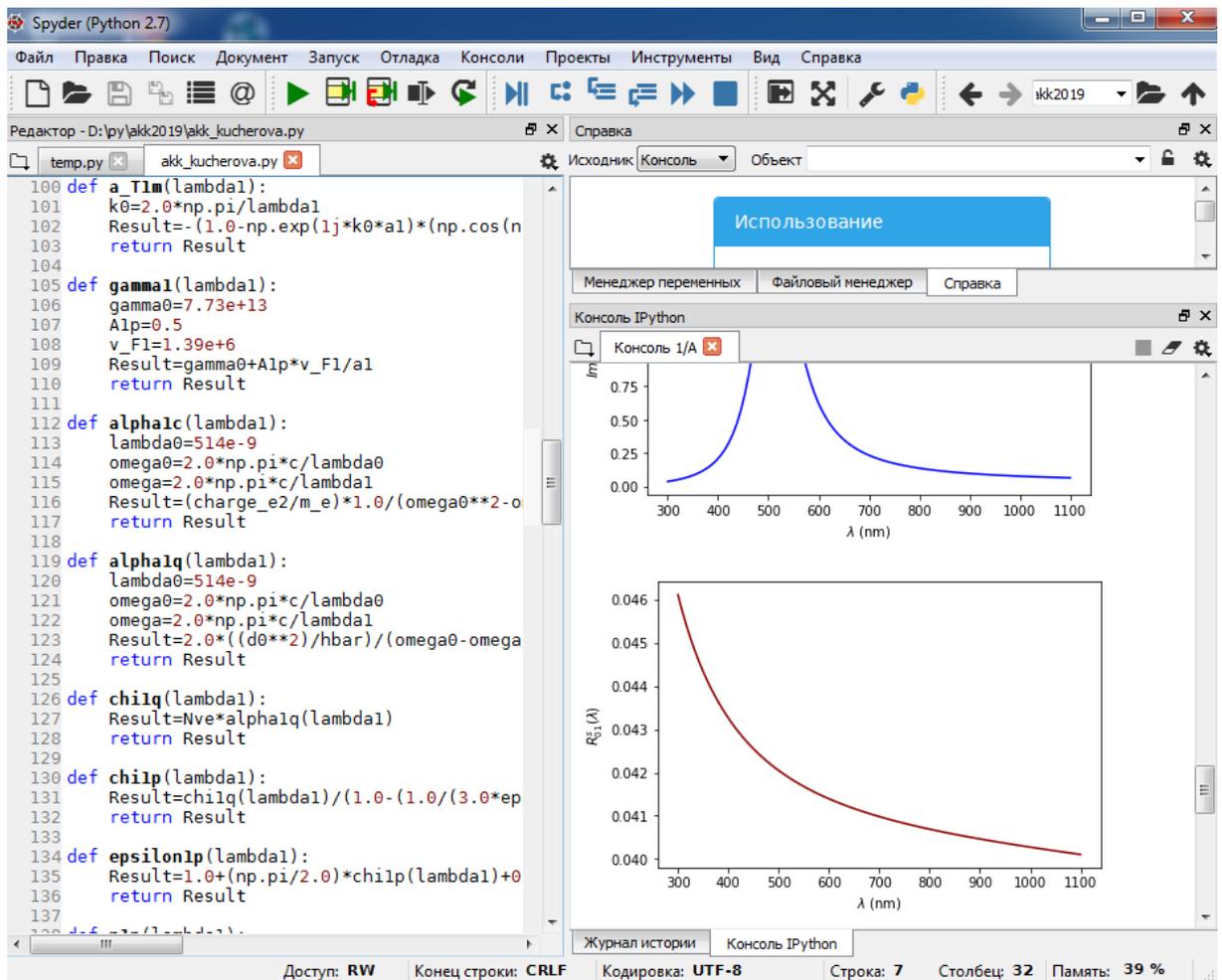


Рис. 3. Третья часть компьютерной программы на языке программирования Python для расчёта оптического отражения и пропускания монослоя наночастиц.

матрице из стекла от длины волны внешнего излучения в диапазоне длин волн излучения от 300 до 1100 нм.

Предполагается применять разработанную компьютерную программу, написанную на языке программирования Python, для расчёта оптического отражения и пропускания графеновых нанокompозитов.

Приведём результаты численных расчётов оптического отражения и пропускания монослоя сферических наночастиц в случае малого заполнения. Компьютерная программа на языке программирования Python позволяет производить расчёты зависимости энергетических коэффициентов отражения и пропускания от монослоя наночастиц от длины волны внешнего излучения.

На рис. 6 изображена зависимость энергетического коэффициента отражения от монослоя наночастиц с радиусом  $a_1 = 2.5$  нм и фактором заполнения  $f_1 = 2\%$  в матрице из стекла при угле падения  $\theta_0 = 1^\circ$  от длины волны внешнего излучения в диапазоне длин волн излучения от 300 до 1100 нм.

На рис. 7 изображена зависимость энергетического коэффициента пропускания от монослоя наночастиц с радиусом  $a_1 = 2.5$  нм и фактором заполнения  $f_1 = 2\%$  в матрице из стекла при угле падения  $\theta_0 = 1^\circ$  от длины волны внешнего излучения в диапазоне длин волн излучения от 300 до 1100 нм.

На рис. 8 изображена зависимость энергетического коэффициента отражения от монослоя наночастиц с радиусом  $a_1 = 2.5$  нм и фактором заполнения  $f_1 = 2\%$  в матрице из стекла при угле падения  $\theta_0 = 10^\circ$  от длины волны внешнего излучения в диапазоне

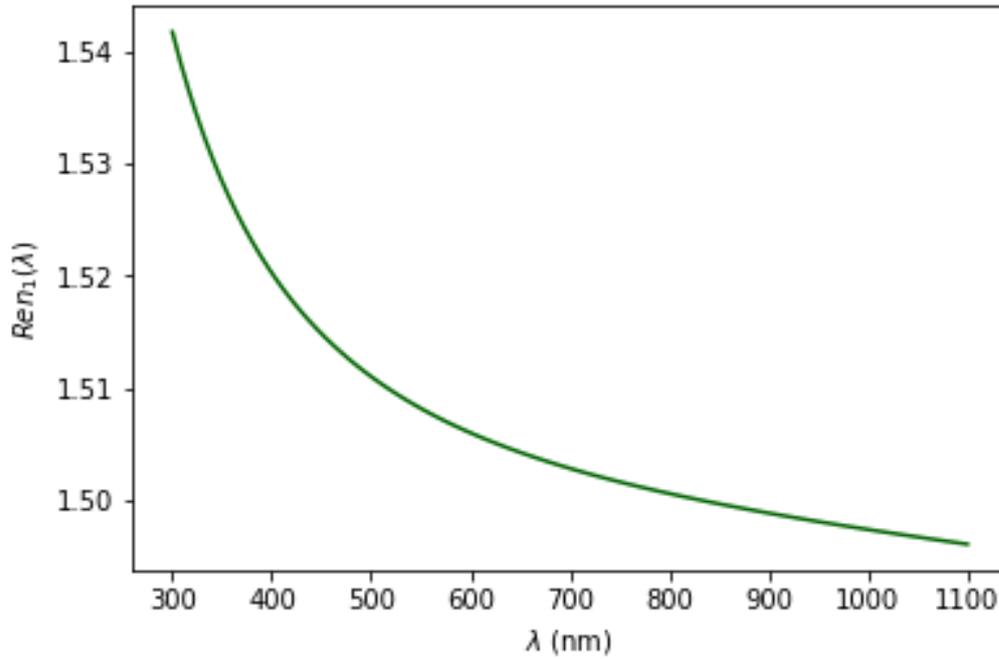


Рис. 4. Действительная часть эффективного показателя преломления монослоя наночастиц с радиусом  $a_1 = 2.5$  нм и фактором заполнения  $f_1 = 2\%$  в матрице из стекла от длины волны внешнего излучения в диапазоне длин волн излучения от 300 до 1100 нм.

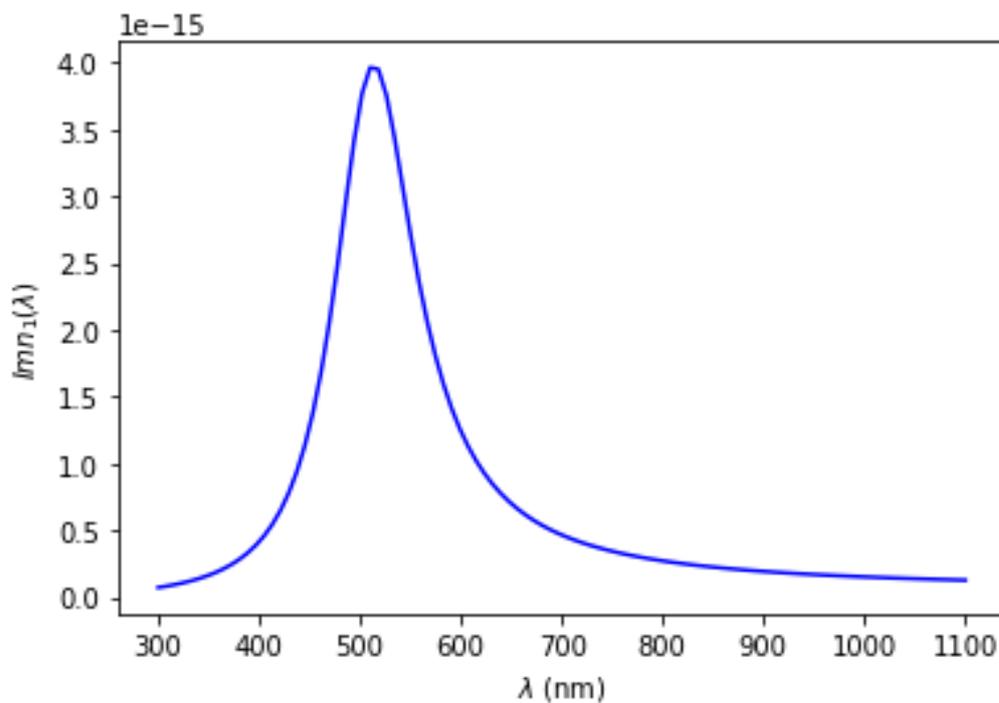


Рис. 5. Мнимая часть эффективного показателя преломления монослоя наночастиц с радиусом  $a_1 = 2.5$  нм и фактором заполнения  $f_1 = 2\%$  в матрице из стекла от длины волны внешнего излучения в диапазоне длин волн излучения от 300 до 1100 нм.

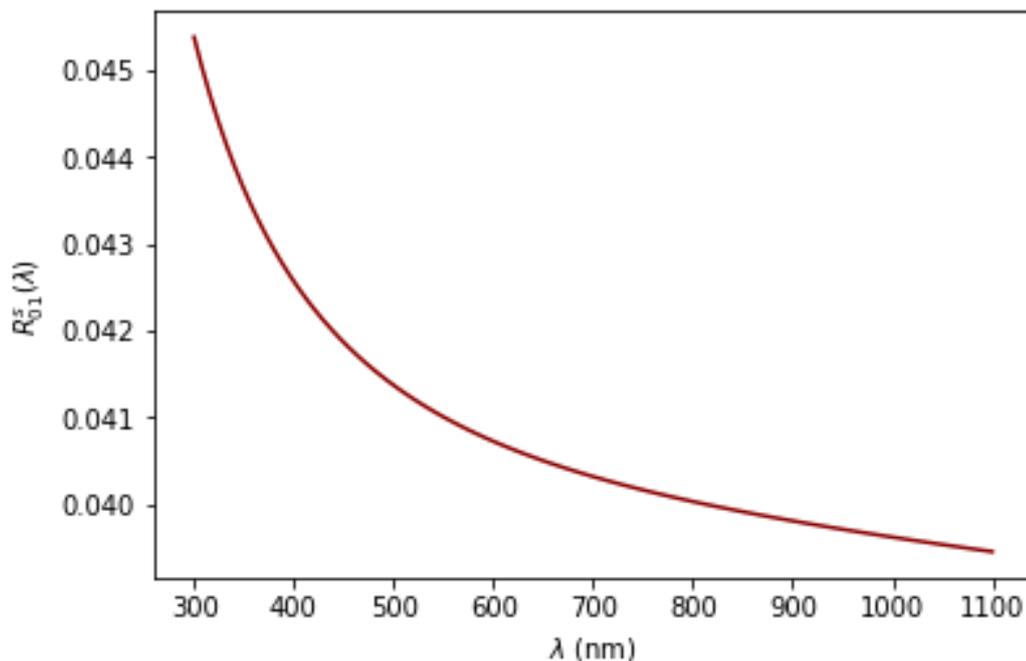


Рис. 6. Энергетический коэффициент отражения от монослоя наночастиц с радиусом  $a_1 = 2.5$  нм и фактором заполнения  $f_1 = 2\%$  в матрице из стекла при угле падения  $\theta_0 = 1^\circ$  от длины волны внешнего излучения в диапазоне длин волн излучения от 300 до 1100 нм.

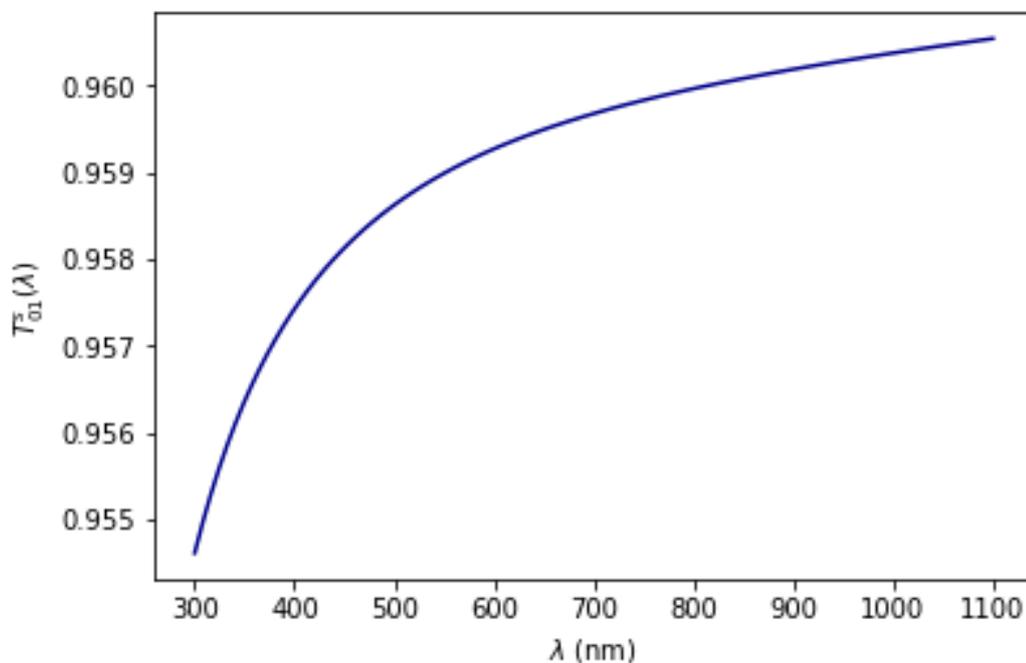


Рис. 7. Энергетический коэффициент пропускания от монослоя наночастиц с радиусом  $a_1 = 2.5$  нм и фактором заполнения  $f_1 = 2\%$  в матрице из стекла при угле падения  $\theta_0 = 1^\circ$  от длины волны внешнего излучения в диапазоне длин волн излучения от 300 до 1100 нм.

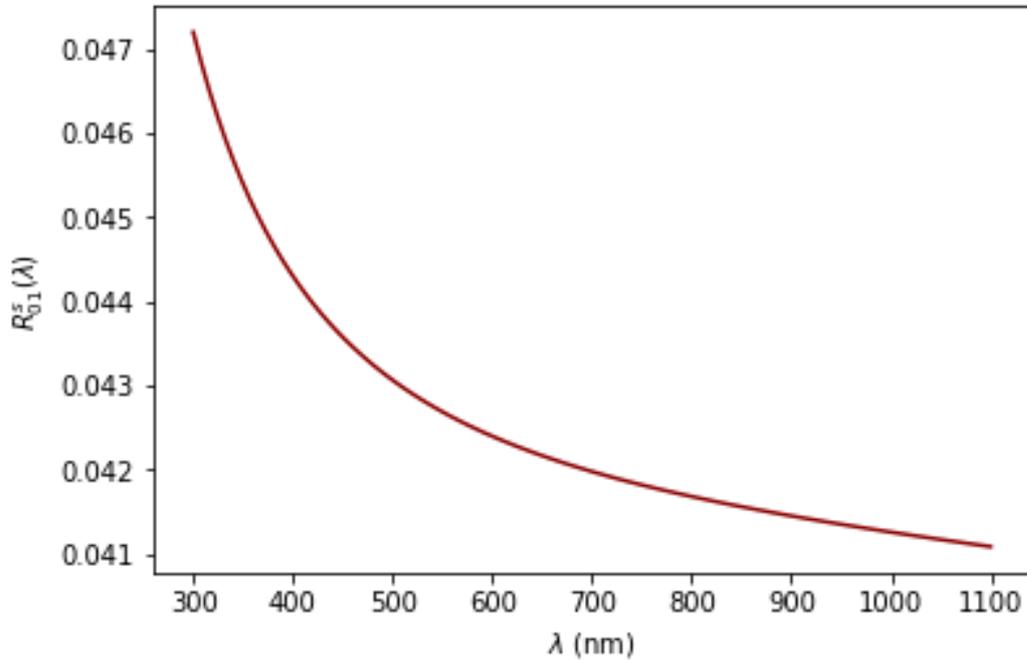


Рис. 8. Энергетический коэффициент отражения от монослоя наночастиц с радиусом  $a_1 = 2.5$  нм и фактором заполнения  $f_1 = 2\%$  в матрице из стекла при угле падения  $\theta_0 = 10^\circ$  от длины волны внешнего излучения в диапазоне длин волн излучения от 300 до 1100 нм.

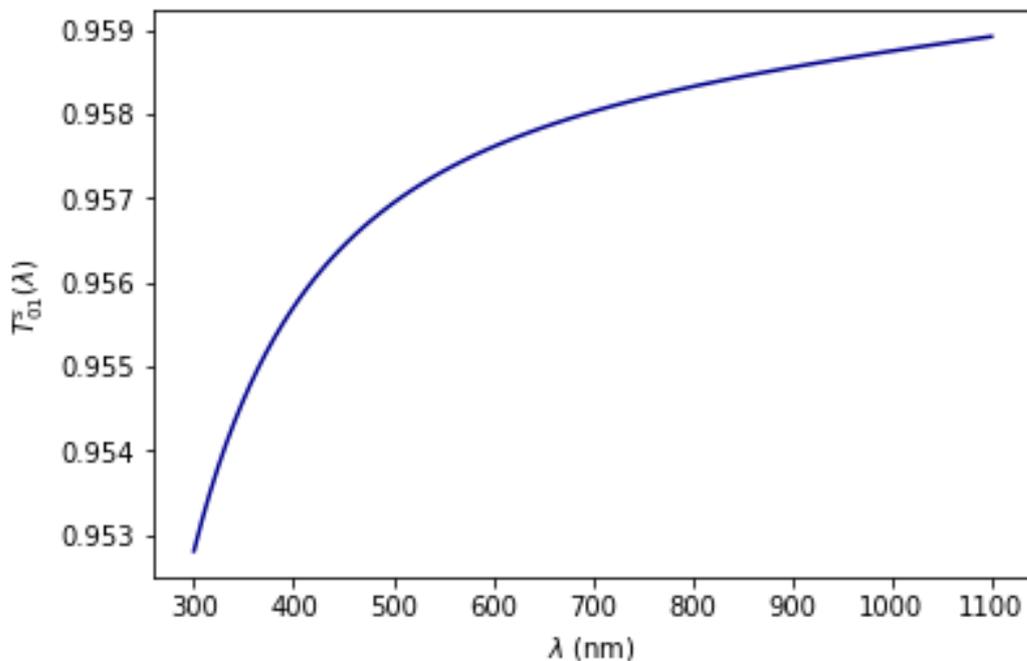


Рис. 9. Энергетический коэффициент пропускания от монослоя наночастиц с радиусом  $a_1 = 2.5$  нм и фактором заполнения  $f_1 = 2\%$  в матрице из стекла при угле падения  $\theta_0 = 10^\circ$  от длины волны внешнего излучения в диапазоне длин волн излучения от 300 до 1100 нм.

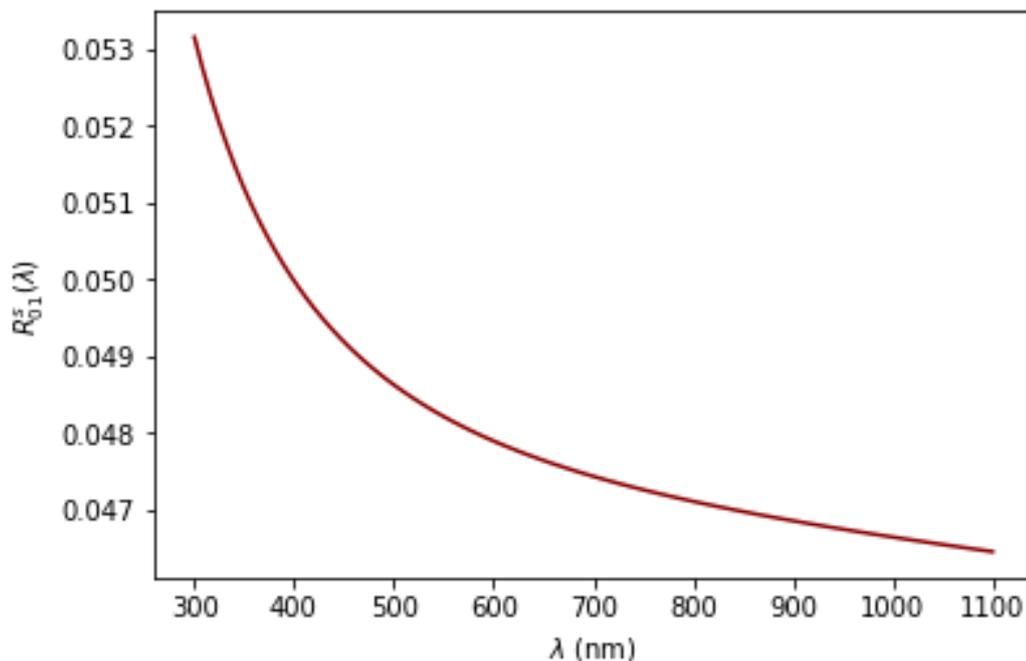


Рис. 10. Энергетический коэффициент отражения от монослоя наночастиц с радиусом  $a_1 = 2.5$  нм и фактором заполнения  $f_1 = 2\%$  в матрице из стекла при угле падения  $\theta_0 = 20^\circ$  от длины волны внешнего излучения в диапазоне длин волн излучения от 300 до 1100 нм.

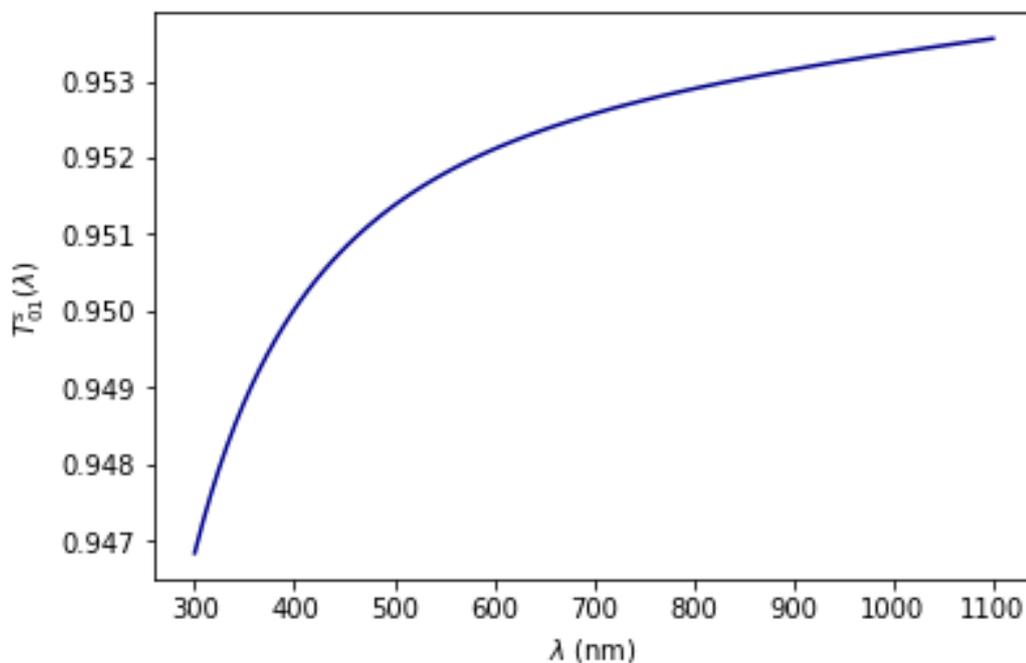


Рис. 11. Энергетический коэффициент пропускания от монослоя наночастиц с радиусом  $a_1 = 2.5$  нм и фактором заполнения  $f_1 = 2\%$  в матрице из стекла при угле падения  $\theta_0 = 20^\circ$  от длины волны внешнего излучения в диапазоне длин волн излучения от 300 до 1100 нм.

длин волн излучения от 300 до 1100 нм. На рис. 9 изображена зависимость энергетического коэффициента пропускания от монослоя наночастиц с радиусом  $a_1 = 2.5$  нм и фактором заполнения  $f_1 = 2\%$  в матрице из стекла при угле падения  $\theta_0 = 10^\circ$  от длины волны внешнего излучения в диапазоне длин волн излучения от 300 до 1100 нм. На рис. 10 изображена зависимость энергетического коэффициента отражения от монослоя наночастиц с радиусом  $a_1 = 2.5$  нм и фактором заполнения  $f_1 = 2\%$  в матрице из стекла при угле падения  $\theta_0 = 20^\circ$  от длины волны внешнего излучения в диапазоне длин волн излучения от 300 до 1100 нм. На рис. 11 изображена зависимость энергетического коэффициента пропускания от монослоя наночастиц с радиусом  $a_1 = 2.5$  нм и фактором заполнения  $f_1 = 2\%$  в матрице из стекла при угле падения  $\theta_0 = 20^\circ$  от длины волны внешнего излучения в диапазоне длин волн излучения от 300 до 1100 нм.

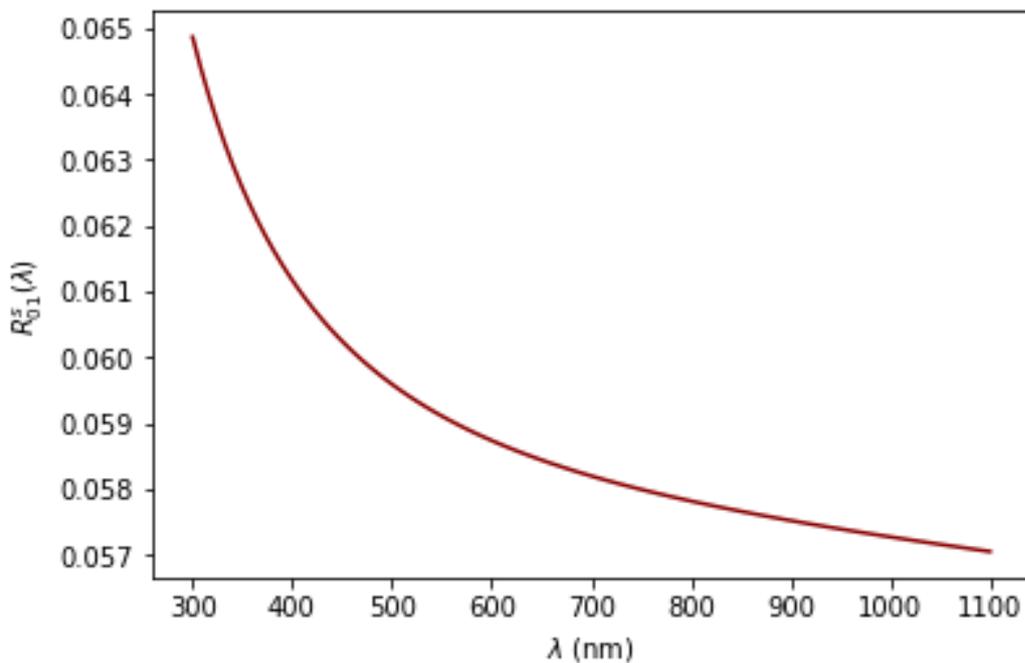


Рис. 12. Энергетический коэффициент отражения от монослоя наночастиц с радиусом  $a_1 = 2.5$  нм и фактором заполнения  $f_1 = 2\%$  в матрице из стекла при угле падения  $\theta_0 = 30^\circ$  в диапазоне длин волн излучения от 300 до 1100 нм.

На рис. 12 изображена зависимость энергетического коэффициента отражения от монослоя наночастиц с радиусом  $a_1 = 2.5$  нм и фактором заполнения  $f_1 = 2\%$  в матрице из стекла при угле падения  $\theta_0 = 30^\circ$  в диапазоне длин волн излучения от 300 до 1100 нм.

На рис. 13 изображена зависимость энергетического коэффициента пропускания от монослоя наночастиц с радиусом  $a_1 = 2.5$  нм и фактором заполнения  $f_1 = 2\%$  в матрице из стекла при угле падения  $\theta_0 = 30^\circ$  от длины волны внешнего излучения в диапазоне длин волн излучения от 300 до 1100 нм.

Опишем результаты численных расчётов эффективного показателя преломления монослоя сферических наночастиц в случае значительного заполнения. Приведём результаты численных расчётов эффективного показателя преломления монослоя сферических наночастиц в случае значительного заполнения наночастицами графенового нанокompозита.

На рис. 14 изображена зависимость действительной части эффективного показателя преломления монослоя наночастиц с радиусом  $a_1 = 2.5$  нм и фактором заполнения  $f_1 = 12\%$  в матрице из стекла от длины волны внешнего излучения в диапазоне длин волн излучения от 300 до 1100 нм.

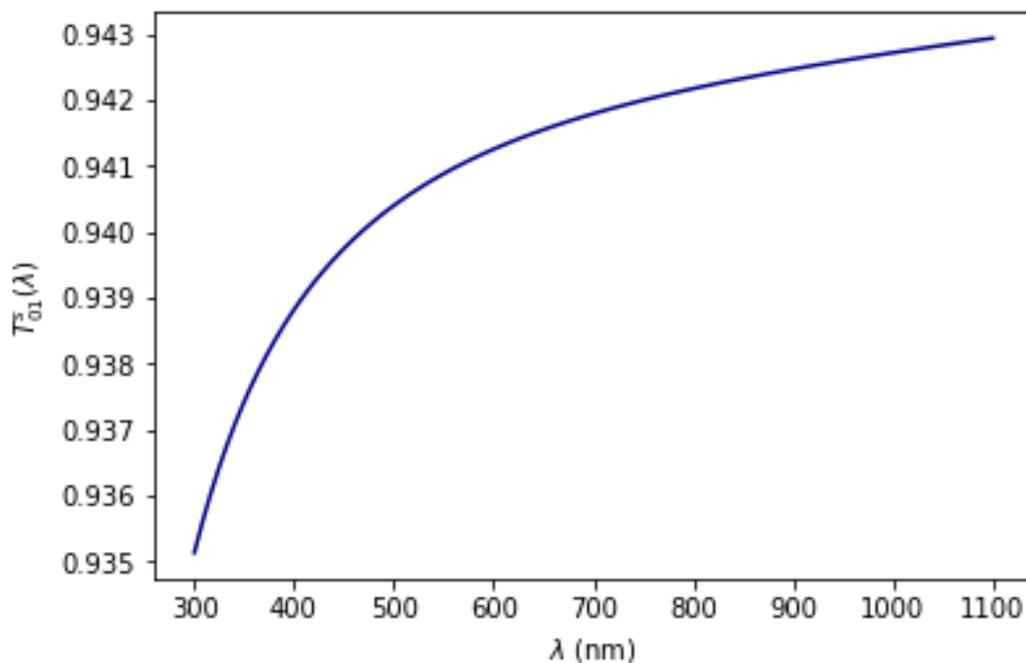


Рис. 13. Энергетический коэффициент пропускания от монослоя наночастиц с радиусом  $a_1 = 2.5$  нм и фактором заполнения  $f_1 = 2\%$  в матрице из стекла при угле падения  $\theta_0 = 30^\circ$  от длины волны внешнего излучения в диапазоне длин волн излучения от 300 до 1100 нм.

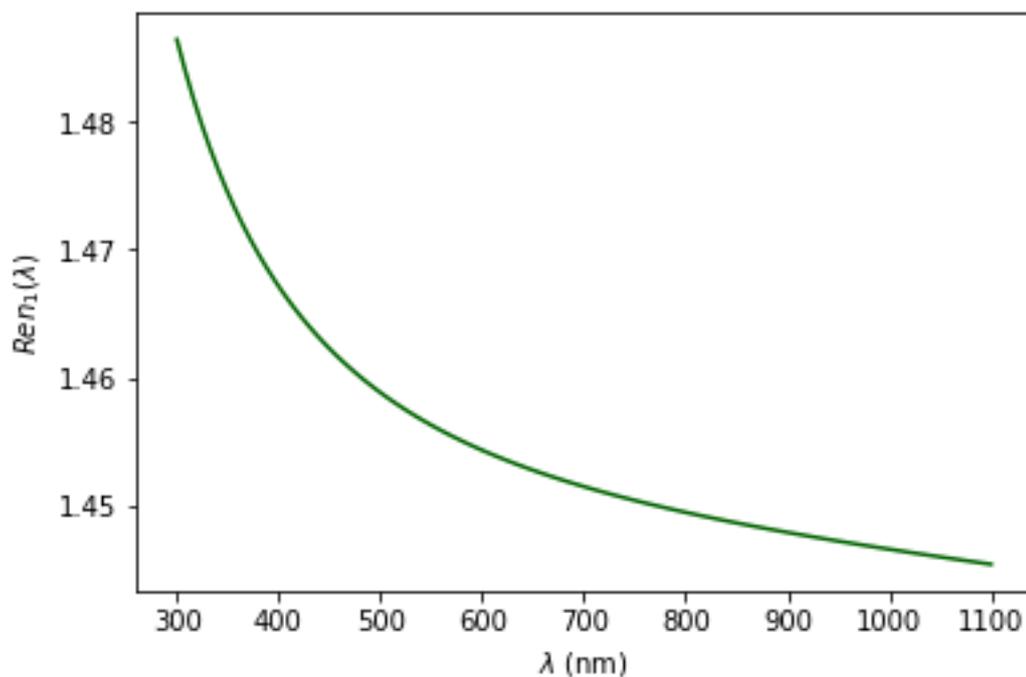


Рис. 14. Действительная часть эффективного показателя преломления монослоя наночастиц с радиусом  $a_1 = 2.5$  нм и фактором заполнения  $f_1 = 12\%$  в матрице из стекла от длины волны внешнего излучения в диапазоне длин волн излучения от 300 до 1100 нм.

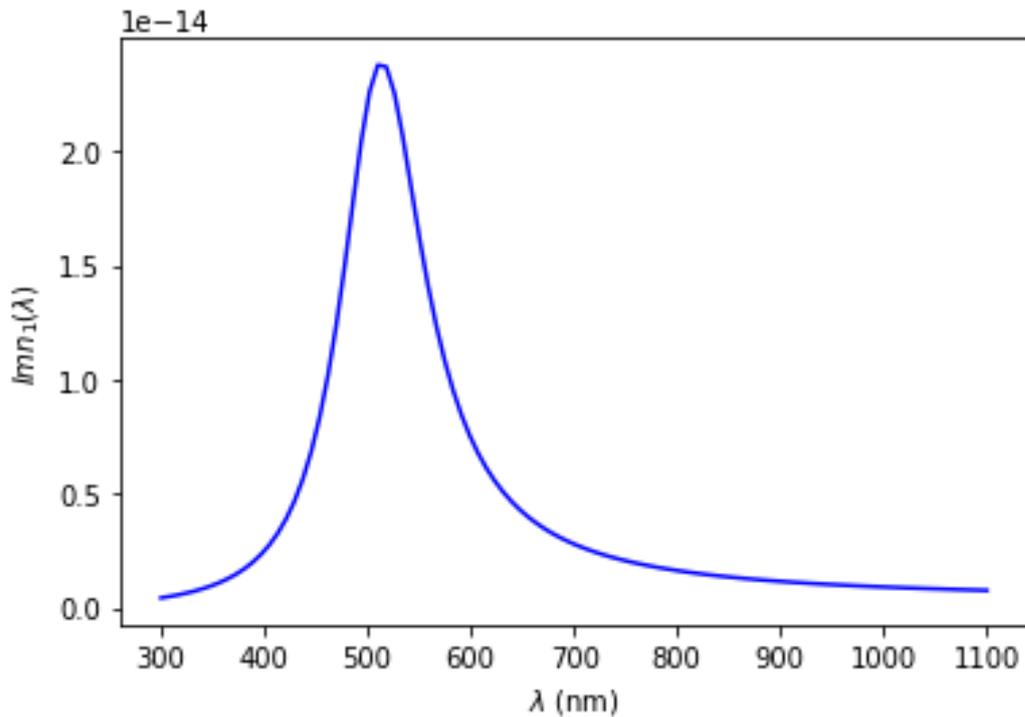


Рис. 15. Мнимая часть эффективного показателя преломления монослоя наночастиц с радиусом  $a_1 = 2.5$  нм и фактором заполнения  $f_1 = 12\%$  в матрице из стекла от длины волны внешнего излучения в диапазоне длин волн излучения от 300 до 1100 нм.

На рис. 15 изображена зависимость мнимой части эффективного показателя преломления монослоя наночастиц с радиусом  $a_1 = 2.5$  нм и фактором заполнения  $f_1 = 12\%$  в матрице из стекла от длины волны внешнего излучения в диапазоне длин волн излучения от 300 до 1100 нм.

Приведём результаты численных расчётов оптического отражения и пропускания монослоя сферических наночастиц в случае значительного заполнения. Рассмотрим результаты численных расчётов энергетических коэффициентов оптического пропускания и отражения монослоя сферических наночастиц в случае значительного заполнения металлическими наночастицами графенового нанокompозита. На рис. 16 изображена зависимость энергетического коэффициента отражения от монослоя наночастиц с радиусом  $a_1 = 2.5$  нм и фактором заполнения  $f_1 = 12\%$  в матрице из стекла при угле падения  $\theta_0 = 1^\circ$  от длины волны внешнего излучения в диапазоне длин волн излучения от 300 до 1100 нм. Из графика видно, что нанокompозит с монослоем наночастиц обладает очень низким отражением оптического излучения в широком диапазоне оптических длин волн.

На рис. 17 изображена зависимость энергетического коэффициента пропускания от монослоя наночастиц с радиусом  $a_1 = 2.5$  нм и фактором заполнения  $f_1 = 12\%$  в матрице из стекла при угле падения  $\theta_0 = 1^\circ$  от длины волны внешнего излучения в диапазоне длин волн излучения от 300 до 1100 нм.

На рис. 18 изображена зависимость энергетического коэффициента отражения от монослоя наночастиц с радиусом  $a_1 = 2.5$  нм и фактором заполнения  $f_1 = 12\%$  в матрице из стекла при угле падения  $\theta_0 = 10^\circ$  от длины волны внешнего излучения в диапазоне длин волн излучения от 300 до 1100 нм.

На рис. 19 изображена зависимость энергетического коэффициента пропускания от монослоя наночастиц с радиусом  $a_1 = 2.5$  нм и фактором заполнения  $f_1 = 12\%$  в матрице из стекла при угле падения  $\theta_0 = 10^\circ$  от длины волны внешнего излучения в диапазоне

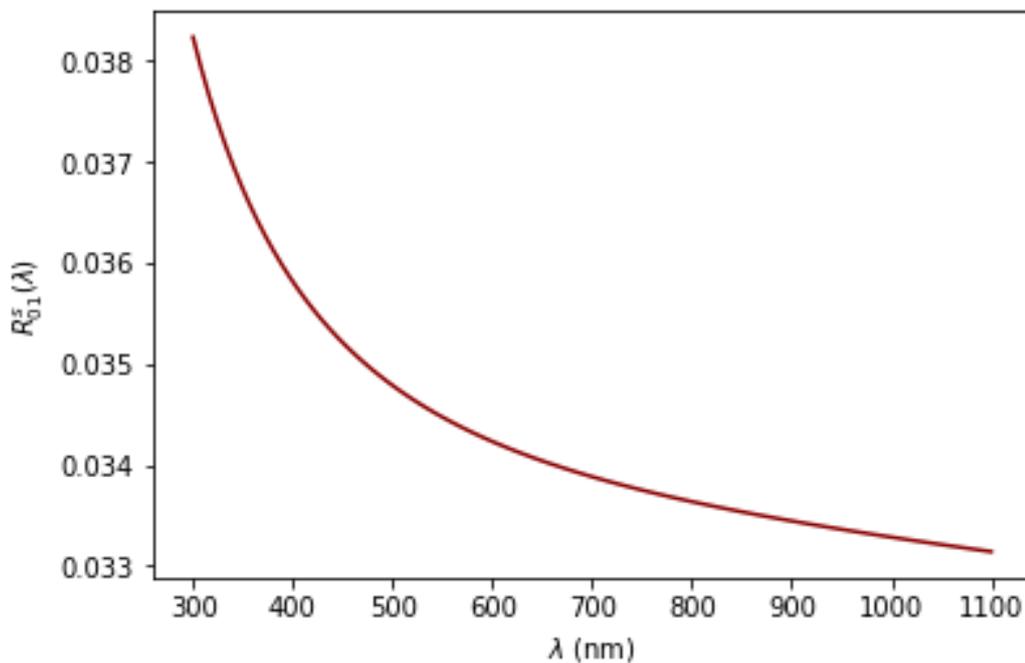


Рис. 16. Энергетический коэффициент отражения от монослоя наночастиц с радиусом  $a_1 = 2.5$  нм и фактором заполнения  $f_1 = 12\%$  в матрице из стекла при угле падения  $\theta_0 = 1^\circ$  от длины волны внешнего излучения в диапазоне длин волн излучения от 300 до 1100 нм.

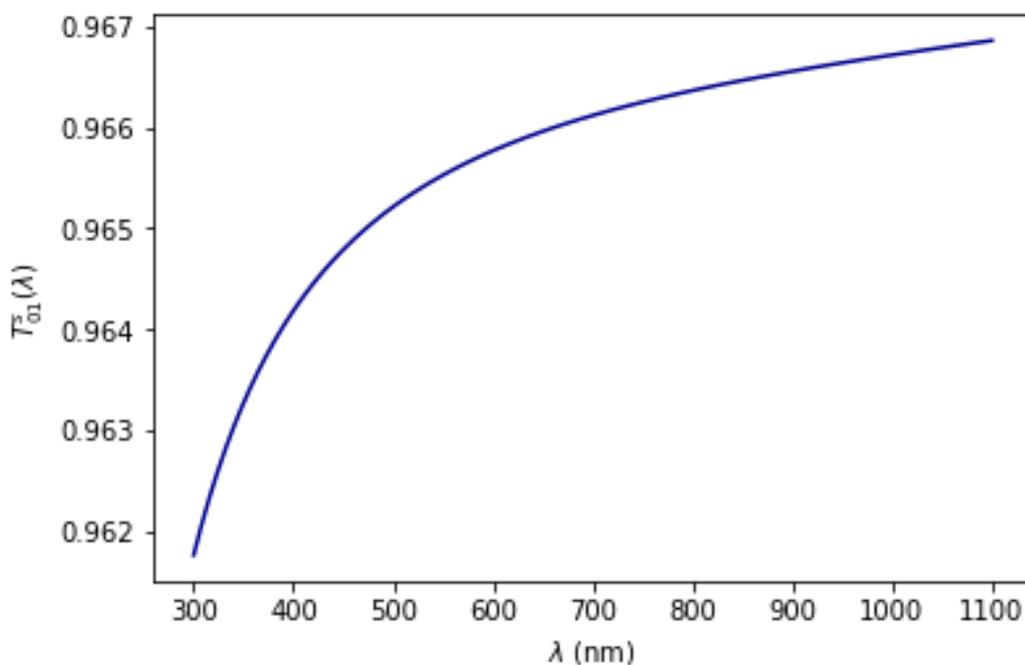


Рис. 17. Энергетический коэффициент пропускания от монослоя наночастиц с радиусом  $a_1 = 2.5$  нм и фактором заполнения  $f_1 = 12\%$  в матрице из стекла при угле падения  $\theta_0 = 1^\circ$  от длины волны внешнего излучения в диапазоне длин волн излучения от 300 до 1100 нм.

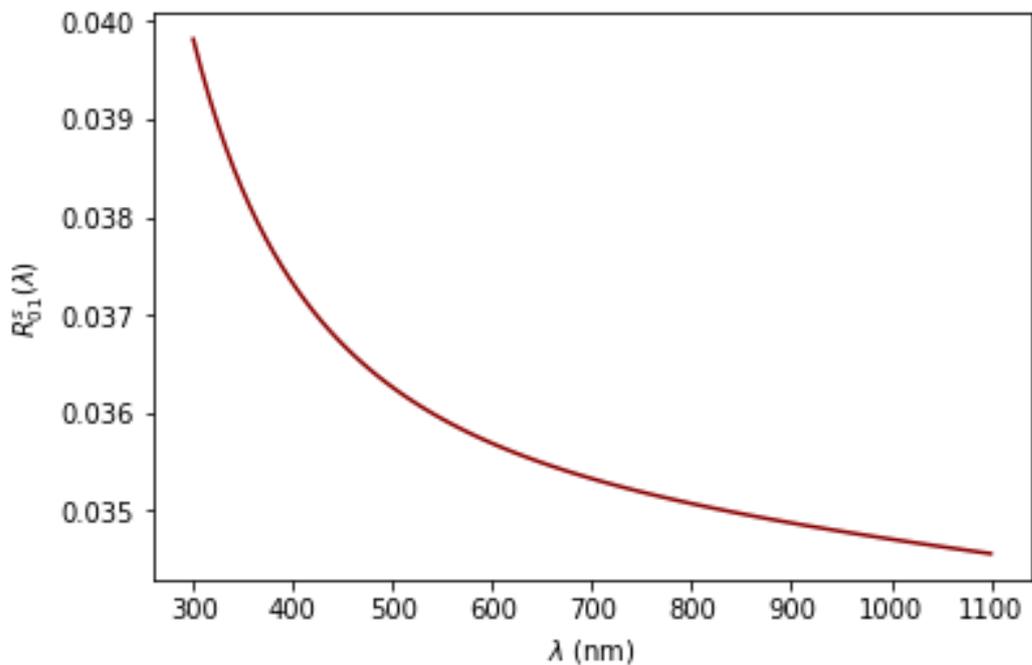


Рис. 18. Энергетический коэффициент отражения от монослоя наночастиц с радиусом  $a_1 = 2.5$  нм и фактором заполнения  $f_1 = 12\%$  в матрице из стекла при угле падения  $\theta_0 = 10^\circ$  от длины волны внешнего излучения в диапазоне длин волн излучения от 300 до 1100 нм.

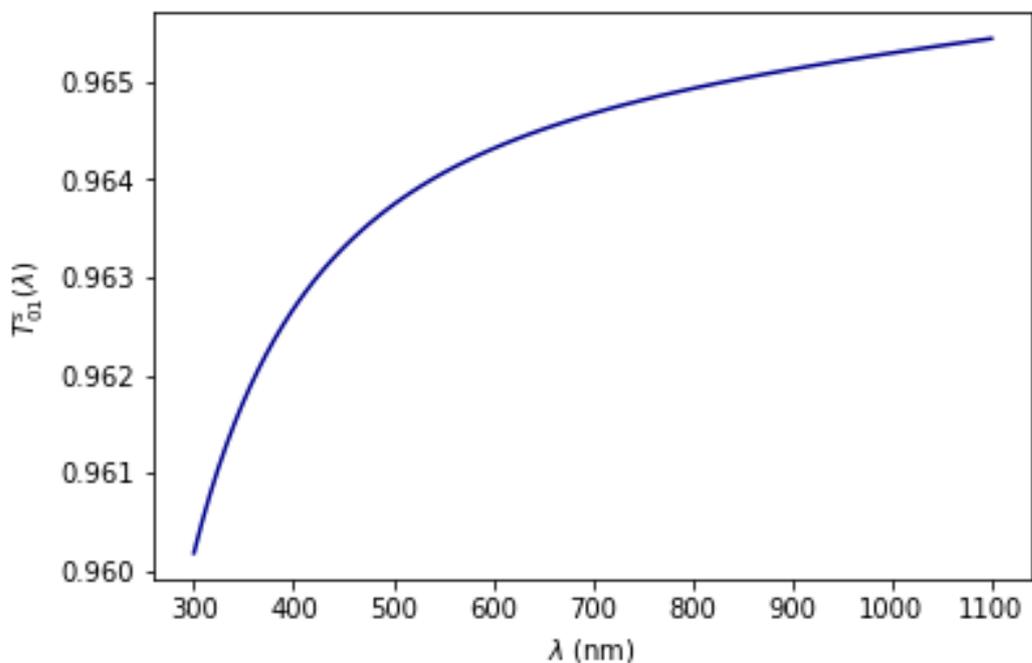


Рис. 19. Энергетический коэффициент пропускания от монослоя наночастиц с радиусом  $a_1 = 2.5$  нм и фактором заполнения  $f_1 = 12\%$  в матрице из стекла при угле падения  $\theta_0 = 10^\circ$  от длины волны внешнего излучения в диапазоне длин волн излучения от 300 до 1100 нм.

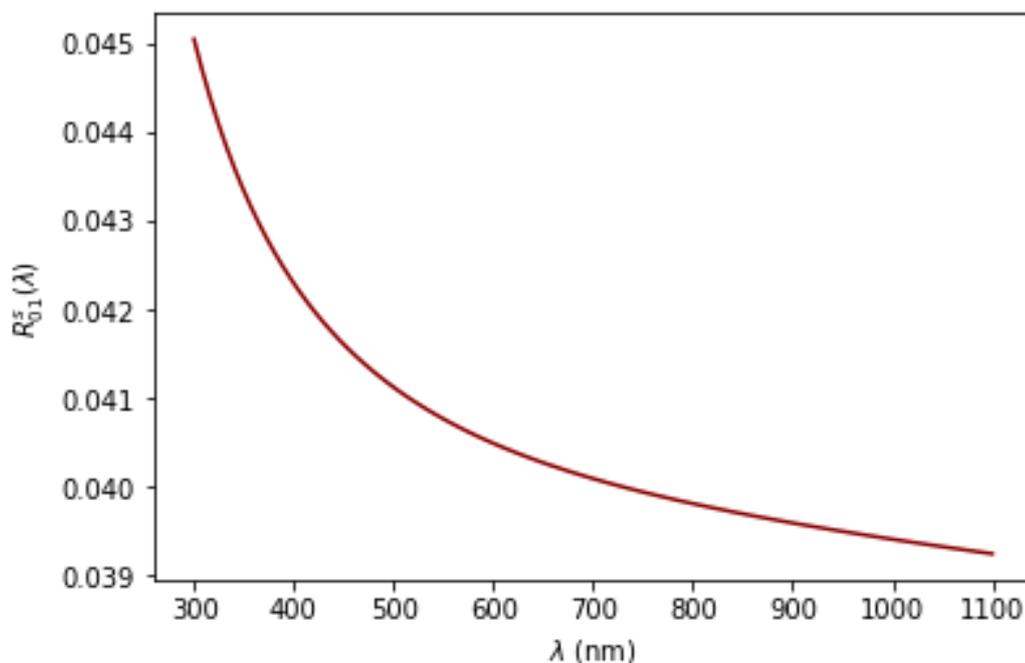


Рис. 20. Энергетический коэффициент отражения от монослоя наночастиц с радиусом  $a_1 = 2.5$  нм и фактором заполнения  $f_1 = 12\%$  в матрице из стекла при угле падения  $\theta_0 = 20^\circ$  от длины волны внешнего излучения в диапазоне длин волн излучения от 300 до 1100 нм.

длин волн излучения от 300 до 1100 нм. На рис. 20 изображена зависимость энергетического коэффициента отражения от монослоя наночастиц с радиусом  $a_1 = 2.5$  нм и фактором заполнения  $f_1 = 12\%$  в матрице из стекла при угле падения  $\theta_0 = 20^\circ$  от длины волны внешнего излучения в диапазоне длин волн излучения от 300 до 1100 нм.

На рис. 21 изображена зависимость энергетического коэффициента пропускания от монослоя наночастиц с радиусом  $a_1 = 2.5$  нм и фактором заполнения  $f_1 = 12\%$  в матрице из стекла при угле падения  $\theta_0 = 20^\circ$  от длины волны внешнего излучения в диапазоне длин волн излучения от 300 до 1100 нм.

На рис. 22 изображена зависимость энергетического коэффициента отражения от монослоя наночастиц с радиусом  $a_1 = 2.5$  нм и фактором заполнения  $f_1 = 12\%$  в матрице из стекла при угле падения  $\theta_0 = 30^\circ$  от длины волны внешнего излучения в диапазоне длин волн излучения от 300 до 1100 нм. На рис. 23 изображена зависимость энергетического коэффициента пропускания от монослоя наночастиц с радиусом  $a_1 = 2.5$  нм и фактором заполнения  $f_1 = 12\%$  в матрице из стекла при угле падения  $\theta_0 = 30^\circ$  от длины волны внешнего излучения в диапазоне длин волн излучения от 300 до 1100 нм.

Компьютерная программа, которая написана на языке программирования Python, позволяет вычислять энергетические коэффициенты отражения и пропускания оптического излучения монослоем наночастиц в диэлектрической матрице, а также графеновым нанокompозитом. В результате проведенных численных расчетов с помощью компьютерной программы на языке программирования Python показано, что монослой в диэлектрической матрице обладает высоким пропусканием и малым отражением оптического излучения в диапазоне длин волн излучения от 300 до 1100 нм. По результатам проведенных численных расчетов показано, что разработанное покрытие из графенового нанокompозита на основе монослоя наночастиц в матрице из стекла в составе графенового нанокompозита отличается от штатных интерференционных покрытий. В результате численных расчетов выявлены основные особенности оптических характе-

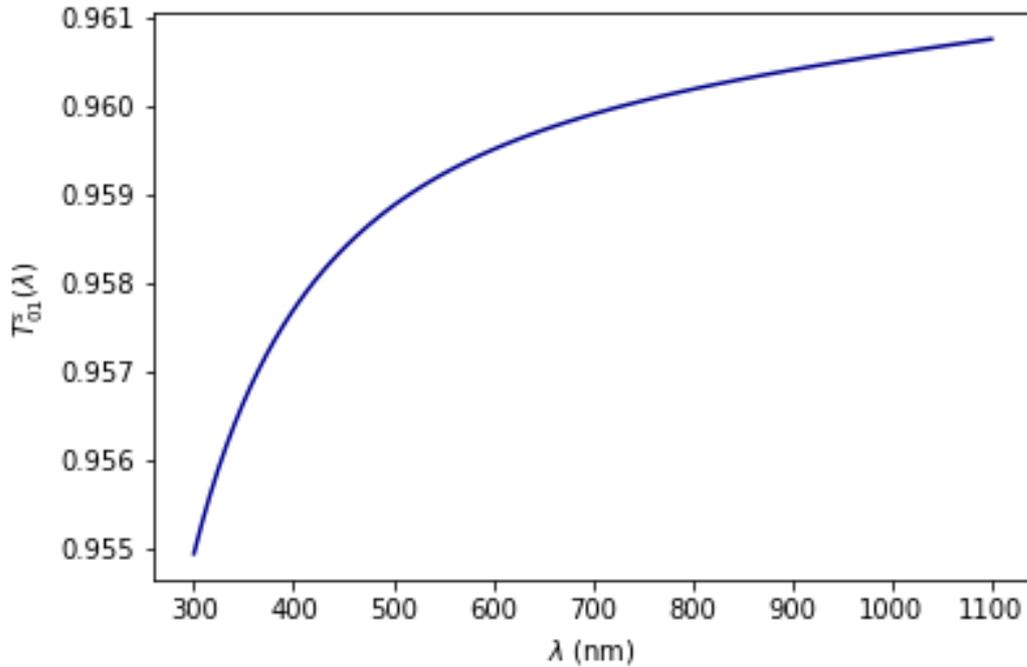


Рис. 21. Энергетический коэффициент пропускания от монослоя наночастиц с радиусом  $a_1 = 2.5$  нм и фактором заполнения  $f_1 = 12\%$  в матрице из стекла при угле падения  $\theta_0 = 20^\circ$  от длины волны внешнего излучения в диапазоне длин волн излучения от 300 до 1100 нм.

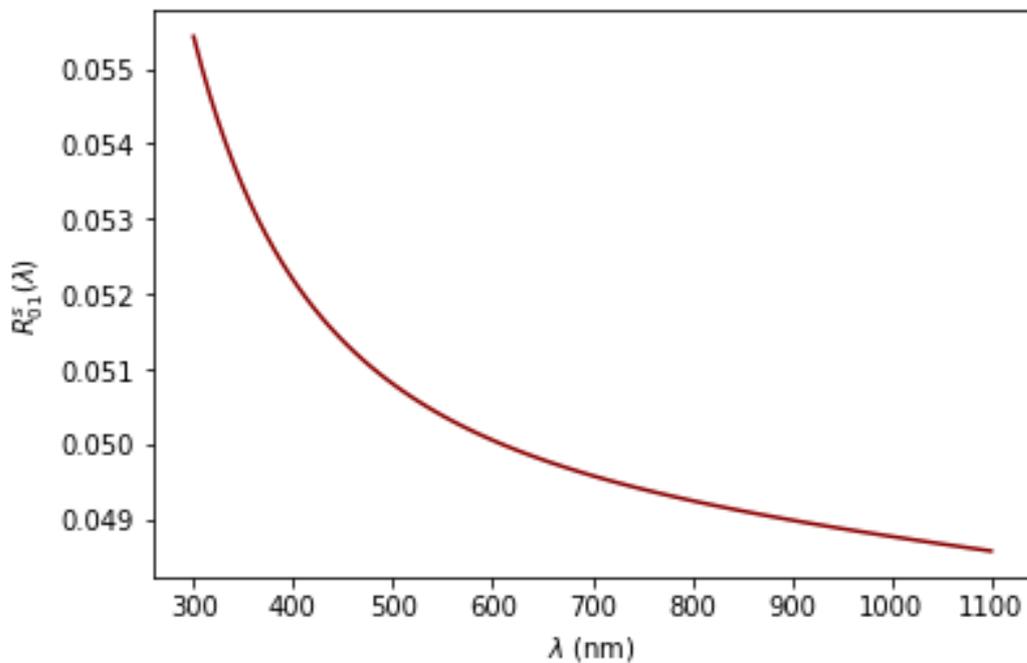


Рис. 22. Энергетический коэффициент отражения от монослоя наночастиц с радиусом  $a_1 = 2.5$  нм и фактором заполнения  $f_1 = 12\%$  в матрице из стекла при угле падения  $\theta_0 = 30^\circ$  от длины волны внешнего излучения в диапазоне длин волн излучения от 300 до 1100 нм.

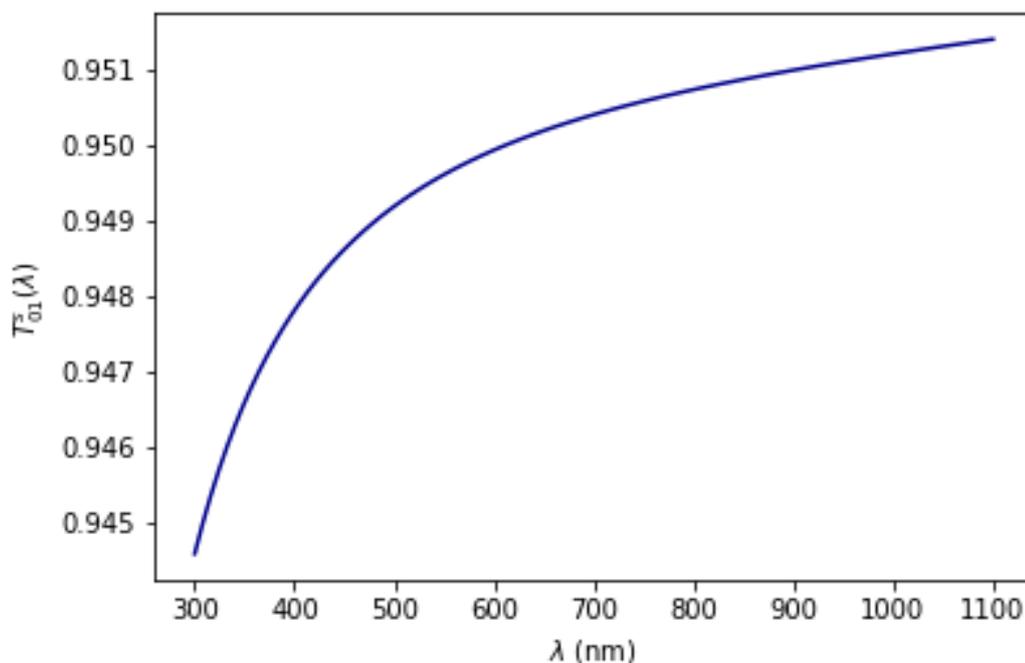


Рис. 23. Энергетический коэффициент пропускания от монослоя наночастиц с радиусом  $a_1 = 2.5$  нм и фактором заполнения  $f_1 = 12\%$  в матрице из стекла при угле падения  $\theta_0 = 30^\circ$  от длины волны внешнего излучения в диапазоне длин волн излучения от 300 до 1100 нм.

ристик покрытий из графеновых нанокмозитов, состоящие в значительном отличии по спектрам оптического отражения и пропускания от штатных интерференционных покрытий для солнечных элементов и солнечных панелей.

## Заключение

В работе решена задача об отражении и пропускании оптического излучения монослоем сферических наночастиц в диэлектрической матрице. Результаты работы могут быть использованы при проектировании новых оптоэлектронных приборов на основе графеновых нанокмозитов.

Выводы по работе можно сформулировать следующим образом:

1. проведенный анализ научной литературы доказывает актуальность расчёта оптических свойств графеновых нанокмозитов,
2. построена теоретическая модель отражения и пропускания оптического излучения монослоем наночастиц в диэлектрической матрице,
3. разработанная компьютерная программа, написанная на языке программирования Python, позволяет вычислять энергетические коэффициенты отражения и пропускания оптического излучения монослоем наночастиц в диэлектрической матрице,
4. в результате численных расчётов показано, что монослой в диэлектрической матрице обладает высоким пропусканием и малым отражением оптического излучения в диапазоне длин волн излучения от 300 до 1100 нм.

Компьютерная программа, которая написана на языке программирования Python, позволяет вычислять энергетические коэффициенты отражения и пропускания оптического излучения монослоем наночастиц в диэлектрической матрице, а также графеновым нанокмозитом.

В результате проведённых численных расчётов с помощью компьютерной программы на языке программирования Python показано, что монослой в диэлектрической матрице обладает высоким пропусканием и малым отражением оптического излучения в диапазоне длин волн излучения от 300 до 1100 нм. По результатам проведённых численных расчётов показано, что разработанное покрытие на основе графенового нанокompозита отличается от штатных интерференционных покрытий. В результате численных расчётов выявлены основные особенности оптических характеристик покрытий из графеновых нанокompозитов, состоящие в значительном отличии по спектрам оптического отражения и пропускания от штатных интерференционных покрытий.

Гипотеза исследования, состоящая в том, что если выявить особенности оптических характеристик графеновых нанокompозитов с монослоями наночастиц, то можно прогнозировать физические свойства приборов оптоэлектроники на основе графеновых нанокompозитов с монослоями наночастиц, подтверждена полностью.

Численное прогнозирование оптических свойств графеновых нанокompозитов с монослоями наночастиц строилось на основе теоретического и численного решения задачи об отражении и пропускании оптической волны от монослоя металлических наночастиц, расположенных на поверхности полубесконечной среды.

#### Список использованных источников

1. Geim A. K., Novoselov K. S. The rise of graphene // *Nature Materials*. — 2007. — mar. — Vol. 6, no. 3. — P. 183–191. — URL: <https://doi.org/10.1038/nmat1849>.
2. Katsnelson Mikhail I. Graphene: carbon in two dimensions // *Materials Today*. — 2007. — jan. — Vol. 10, no. 1-2. — P. 20–27. — URL: [https://doi.org/10.1016/s1369-7021\(06\)71788-6](https://doi.org/10.1016/s1369-7021(06)71788-6).
3. Westervelt R. M. Applied physics: Graphene Nanoelectronics // *Science*. — 2008. — apr. — Vol. 320, no. 5874. — P. 324–325. — URL: <https://doi.org/10.1126/science.1156936>.
4. Fabrication of microcellular polymer/graphene nanocomposite foams / Bin Shen [et al.] // *Polymer International*. — 2012. — sep. — Vol. 61, no. 12. — P. 1693–1702. — URL: <https://doi.org/10.1002/pi.4355>.
5. Epitaxial graphene: a new material / Th. Seyller [et al.] // *Physica status solidi (b)*. — 2008. — jul. — Vol. 245, no. 7. — P. 1436–1446. — URL: <https://doi.org/10.1002/pssb.200844143>.
6. Avouris Phaedon, Chen Zhihong, Perebeinos Vasili. Carbon-based electronics // *Nature Nanotechnology*. — 2007. — sep. — Vol. 2, no. 10. — P. 605–615. — URL: <https://doi.org/10.1038/nnano.2007.300>.
7. Uptake of H<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> by Graphene / Anupama Ghosh [et al.] // *The Journal of Physical Chemistry C*. — 2008. — sep. — Vol. 112, no. 40. — P. 15704–15707. — URL: <https://doi.org/10.1021/jp805802w>.
8. ABS nanocomposite films based on functionalized-graphene sheets / Cheol Heo [et al.] // *Journal of Applied Polymer Science*. — 2011. — Vol. 124. — P. 4663–4670. — URL: <https://doi.org/10.1002/app.35404>.
9. Graphene Based Electrochemical Sensors and Biosensors: A Review / Yuyan Shao [et al.] // *Electroanalysis*. — 2010. — mar. — Vol. 22, no. 10. — P. 1027–1036. — URL: <https://doi.org/10.1002/elan.200900571>.

10. Polyoxometalate-Graphene Nanocomposite Modified Electrode for Electrocatalytic Detection of Ascorbic Acid / Weiyang Zhang [et al.] // *Electroanalysis*. — 2013. — nov. — Vol. 26, no. 1. — P. 178–183. — URL: <https://doi.org/10.1002/elan.201300343>.
11. Jin-Phillipp N. Y., Rühle M. Carbon nanotube/metal interface studied by cross-sectional transmission electron microscopy // *Physical Review B*. — 2004. — dec. — Vol. 70, no. 24. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.70.245421>.
12. Length effect of carbon nanotubes on the strengthening mechanisms in metal matrix composites / B. Chen [et al.] // *Acta Materialia*. — 2017. — nov. — Vol. 140. — P. 317–325. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.08.048>.
13. Strengthening and toughening mechanisms in graphene-Al nanolaminated composite micro-pillars / Siwen Feng [et al.] // *Acta Materialia*. — 2017. — feb. — Vol. 125. — P. 98–108. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.11.043>.
14. Atomic and electronic structure of simple metal/graphene and complex metal/graphene/metal interfaces / Lyudmyla Adamska [et al.] // *Physical Review B*. — 2012. — may. — Vol. 85, no. 19. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.85.195443>.
15. Olsen Thomas, Thygesen Kristian S. Random phase approximation applied to solids, molecules, and graphene-metal interfaces: From van der Waals to covalent bonding // *Physical Review B*. — 2013. — feb. — Vol. 87, no. 7. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.87.075111>.
16. Effects of shape and flexibility of conductive fillers in nanocomposites on percolating network formation and electrical conductivity / Seulki Kwon [et al.] // *Physical Review E*. — 2016. — mar. — Vol. 93, no. 3. — URL: <https://doi.org/10.1103/physreve.93.032501>.
17. moussa Abdellah Ait, Jassemnejad Bahaeddin. Optimizing thermal conductivity in functionalized macromolecules using Langevin dynamics and the globalized and bounded Nelder-Mead algorithm // *Physical Review E*. — 2014. — may. — Vol. 89, no. 5. — URL: <https://doi.org/10.1103/physreve.89.053313>.
18. Moussa Abdellah Ait, Mullen Kieran. Using normal modes to calculate and optimize thermal conductivity in functionalized macromolecules // *Physical Review E*. — 2011. — may. — Vol. 83, no. 5. — URL: <https://doi.org/10.1103/physreve.83.056708>.
19. Novoselov K. S. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films // *Science*. — 2004. — oct. — Vol. 306, no. 5696. — P. 666–669. — URL: <https://doi.org/10.1126/science.1102896>.
20. Mattausch Alexander, Pankratov Oleg. Density functional study of graphene overlayers on SiC // *physica status solidi (b)*. — 2008. — jul. — Vol. 245, no. 7. — P. 1425–1435. — URL: <https://doi.org/10.1002/pssb.200844031>.
21. Flexible Graphene Films via the Filtration of Water-Soluble Noncovalent Functionalized Graphene Sheets / Yuxi Xu [et al.] // *Journal of the American Chemical Society*. — 2008. — may. — Vol. 130, no. 18. — P. 5856–5857. — URL: <https://doi.org/10.1021/ja800745y>.
22. Processable aqueous dispersions of graphene nanosheets / Dan Li [et al.] // *Nature Nanotechnology*. — 2008. — jan. — Vol. 3, no. 2. — P. 101–105. — URL: <https://doi.org/10.1038/nnano.2007.451>.

23. Eda Goki, Fanchini Giovanni, Chhowalla Manish. Large-area ultrathin films of reduced graphene oxide as a transparent and flexible electronic material // *Nature Nanotechnology*. — 2008. — apr. — Vol. 3, no. 5. — P. 270–274. — URL: <https://doi.org/10.1038/nnano.2008.83>.
24. Berger C. Electronic Confinement and Coherence in Patterned Epitaxial Graphene // *Science*. — 2006. — may. — Vol. 312, no. 5777. — P. 1191–1196. — URL: <https://doi.org/10.1126/science.1125925>.
25. Graphene-based composite materials / Sasha Stankovich [et al.] // *Nature*. — 2006. — jul. — Vol. 442, no. 7100. — P. 282–286. — URL: <https://doi.org/10.1038/nature04969>.
26. A Chemical Route to Graphene for Device Applications / Scott Gilje [et al.] // *Nano Letters*. — 2007. — nov. — Vol. 7, no. 11. — P. 3394–3398. — URL: <https://doi.org/10.1021/nl0717715>.
27. Detection of individual gas molecules adsorbed on graphene / F. Schedin [et al.] // *Nature Materials*. — 2007. — jul. — Vol. 6, no. 9. — P. 652–655. — URL: <https://doi.org/10.1038/nmat1967>.
28. Electromechanical Resonators from Graphene Sheets / J. S. Bunch [et al.] // *Science*. — 2007. — jan. — Vol. 315, no. 5811. — P. 490–493. — URL: <https://doi.org/10.1126/science.1136836>.
29. Functionalized Single Graphene Sheets Derived from Splitting Graphite Oxide / Hannes C. Schniepp [et al.] // *The Journal of Physical Chemistry B*. — 2006. — may. — Vol. 110, no. 17. — P. 8535–8539. — URL: <https://doi.org/10.1021/jp060936f>.
30. Structure and electronic properties of graphite nanoparticles / Odd E. Andersson [et al.] // *Physical Review B*. — 1998. — dec. — Vol. 58, no. 24. — P. 16387–16395. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.58.16387>.
31. Montoya Alejandro, Mondragón Fanor, Truong Thanh N. CO<sub>2</sub> adsorption on carbonaceous surfaces: a combined experimental and theoretical study // *Carbon*. — 2003. — jan. — Vol. 41, no. 1. — P. 29–39. — URL: [https://doi.org/10.1016/s0008-6223\(02\)00249-x](https://doi.org/10.1016/s0008-6223(02)00249-x).
32. Bagchi Soumendu, Ke Changhong, Chew Huck Beng. Oxidation effect on the shear strength of graphene on aluminum and titanium surfaces // *Physical Review B*. — 2018. — nov. — Vol. 98, no. 17. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.98.174106>.
33. Hu Lin, Desai Tapan, Koblinski Pawel. Determination of interfacial thermal resistance at the nanoscale // *Physical Review B*. — 2011. — may. — Vol. 83, no. 19. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.83.195423>.
34. CdS/Graphene Nanocomposite Photocatalysts / Qin Li [et al.] // *Advanced Energy Materials*. — 2015. — apr. — Vol. 5, no. 14. — P. 1500010. — URL: <https://doi.org/10.1002/aenm.201500010>.
35. 2D-Aligned Graphene Sheets in Transparent Polyimide/Graphene Nanocomposite Films Based on Noncovalent Interactions Between Poly(amic acid) and Graphene Carboxylic Acid / Gwang Yeon Kim [et al.] // *Macromolecular Materials and Engineering*. —

2011. — nov. — Vol. 297, no. 4. — P. 303–311. — URL: <https://doi.org/10.1002/mame.201100211>.
36. Jeong Young Gyu, An Ji-Eun. UV-cured epoxy/graphene nanocomposite films: preparation, structure and electric heating performance // *Polymer International*. — 2014. — feb. — Vol. 63, no. 11. — P. 1895–1901. — URL: <https://doi.org/10.1002/pi.4713>.
37. Superior Electrochemical Performance of Sulfur/Graphene Nanocomposite Material for High-Capacity Lithium-Sulfur Batteries / Bei Wang [et al.] // *Chemistry - An Asian Journal*. — 2012. — mar. — Vol. 7, no. 7. — P. 1637–1643. — URL: <https://doi.org/10.1002/asia.201200004>.
38. The preparation and properties of polystyrene/functionalized graphene nanocomposite foams using supercritical carbon dioxide / Chaoqun Li [et al.] // *Polymer International*. — 2012. — nov. — Vol. 62. — P. 1077–1084. — URL: <https://doi.org/10.1002/pi.4394>.
39. Charoeythornkhajhornchai Pollawat, Samthong Chavakorn, Somwangthanaroj Anongnat. Effect of graphene treated with cyclohexyl diamine by diazonium reaction on cure kinetics, mechanical, thermal, and physical properties of natural rubber/graphene nanocomposite foam // *Polymer Composites*. — 2018. — dec. — Vol. 40, no. S2. — P. E1766–E1776. — URL: <https://doi.org/10.1002/pc.25160>.
40. Intrinsic flame-retardant urea formaldehyde/graphene nanocomposite foam: Structure and reinforcing mechanism / Buyong Wu [et al.] // *Polymer Composites*. — 2018. — sep. — Vol. 40, no. S1. — P. E811–E820. — URL: <https://doi.org/10.1002/pc.25028>.
41. Kumar Sandeep, Hembram K. P. S. S., Waghmare Umesh V. Intrinsic buckling strength of graphene: First-principles density functional theory calculations // *Physical Review B*. — 2010. — sep. — Vol. 82, no. 11. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.82.115411>.
42. Vacancy filling effect of graphene on photoluminescence behavior of ZnO/graphene nanocomposite / Eunsil Lee [et al.] // *Physica status solidi (RRL) - Rapid Research Letters*. — 2014. — aug. — Vol. 8, no. 10. — P. 836–840. — URL: <https://doi.org/10.1002/pssr.201409225>.
43. Marashdeh Wajeeh F., Longun Jimmy, Iroh Jude O. Relaxation behavior and activation energy of relaxation for polyimide and polyimide-graphene nanocomposite // *Journal of Applied Polymer Science*. — 2016. — apr. — Vol. 133, no. 28. — URL: <https://doi.org/10.1002/app.43684>.
44. Hierarchically aligned fibrous hydrogel films through microfluidic self-assembly of graphene and polysaccharides / Akhil Patel [et al.] // *Biotechnology and Bioengineering*. — 2018. — aug. — Vol. 115, no. 10. — P. 2654–2667. — URL: <https://doi.org/10.1002/bit.26801>.
45. Graphene-Polypyrrole Nanocomposite: An Ideal Electroactive Material for High Performance Supercapacitors / Alagiri Mani [et al.] // *Graphene Materials*. — John Wiley & Sons, Inc., 2015. — apr. — P. 225–244. — URL: <https://doi.org/10.1002/9781119131816.ch7>.

46. Flexible Solid-State Supercapacitors with Enhanced Performance from Hierarchically Graphene Nanocomposite Electrodes and Ionic Liquid Incorporated Gel Polymer Electrolyte / Lanxiang Feng [et al.] // *Advanced Functional Materials*. — 2017. — nov. — Vol. 28, no. 4. — P. 1704463. — URL: <https://doi.org/10.1002/adfm.201704463>.
47. Carbon Nanodots as Feedstock for a Uniform Hematite-Graphene Nanocomposite / Volker Strauss [et al.] // *Small*. — 2018. — nov. — Vol. 14, no. 51. — P. 1803656. — URL: <https://doi.org/10.1002/smll.201803656>.
48. Dhibar Saptarshi, Das Chapal Kumar. Silver nanoparticles decorated polypyrrole/graphene nanocomposite: A potential candidate for next-generation supercapacitor electrode material // *Journal of Applied Polymer Science*. — 2017. — jan. — Vol. 134, no. 16. — URL: <https://doi.org/10.1002/app.44724>.
49. Removal of Organic Dyes in Environmental Water onto Magnetic-Sulfonic Graphene Nanocomposite / Sui Wang [et al.] // *CLEAN - Soil, Air, Water*. — 2013. — Vol. 41, no. 10. — P. 992–1001. — URL: <https://doi.org/10.1002/clen.201200460>.
50. Vertically oriented polyaniline-graphene nanocomposite based on functionalized graphene for supercapacitor electrode / Qiang Zhao [et al.] // *Journal of Applied Polymer Science*. — 2017. — jan. — Vol. 134, no. 19. — URL: <https://doi.org/10.1002/app.44808>.
51. Graphene-Based Nanocomposites for Energy Storage / Liwen Ji [et al.] // *Advanced Energy Materials*. — 2016. — jun. — Vol. 6, no. 16. — P. 1502159. — URL: <https://doi.org/10.1002/aenm.201502159>.
52. Born Max, Wolf Emil. *Principles of Optics*. — Oxford : Pergamon Press, 1969. — 720 p.
53. Gadomskii O. N., Shalin A. S. Effect of optical blooming of a nanocrystal monolayer and the interface between two media // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. — 2007. — oct. — Vol. 105, no. 4. — P. 761–773. — URL: <http://dx.doi.org/10.1134/S106377610710010X>.

#### Сведения об авторах:

**Константин Константинович Алтунин** — кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры физики и технических дисциплин ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», Ульяновск, Россия.

E-mail: [kostya\\_altunin@mail.ru](mailto:kostya_altunin@mail.ru)

ORCID iD  0000-0002-0725-9416

Web of Science ResearcherID  I-5739-2014

SCOPUS ID  57201126207

**Юлия Александровна Кучерова** — студент факультета физико-математического и технологического образования ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», Ульяновск, Россия.

E-mail: [melneko@mail.ru](mailto:melneko@mail.ru)

ORCID iD  0000-0002-9759-839X

Web of Science ResearcherID  ABD-4970-2020

# Investigation of the optical properties of graphene nanosystems using the Python numerical computations

K. K. Altunin , Yu. A. Kucherova 

*Ulyanovsk State Pedagogical University, 432071, Ulyanovsk, Russia*

Submitted April 8, 2021

Resubmitted April 12, 2021

Published June 12, 2021

---

**Abstract.** The physical features of optical processes in graphene nanosystems are considered. Numerical calculations of the transmittance and reflectivity of graphene nanosystems located in an external field of optical radiation have been carried out. To calculate the optical characteristics of graphene nanosystems, a computer program in the Python programming language has been compiled, which allows plotting the dependences of the reflectance and transmittance of graphene nanosystems on the wavelength of external optical radiation. The dependences of the energy coefficients of optical transmission and reflection of graphene nanosystems on the radiation wavelength in the optical wavelength range are obtained for various values of the nanosystem parameters. It is shown that it is possible to effectively control the optical transmission of optical radiation through a graphene nanosystem by changing the parameters of graphene nanosystems.

**Keywords:** nanoelectronics, graphene, graphene nanoelectronics, nanocomposite, graphene nanocomposite, graphene nanoitem, nanoparticle, monolayer of particles, optical radiation, optical transmission, optical reflection, optical coating, lattice sum method

PACS: 42.25.Bs

---

## References

1. ABS nanocomposite films based on functionalized-graphene sheets / Cheol Heo [et al.] // Journal of Applied Polymer Science. — 2011. — Vol. 124. — P. 4663–4670. — URL: <https://doi.org/10.1002/app.35404>.
2. Epitaxial graphene: a new material / Th. Seyller [et al.] // Physica status solidi (b). — 2008. — jul. — Vol. 245, no. 7. — P. 1436–1446. — URL: <https://doi.org/10.1002/pssb.200844143>.
3. Avouris Phaedon, Chen Zhihong, Perebeinos Vasili. Carbon-based electronics // Nature Nanotechnology. — 2007. — sep. — Vol. 2, no. 10. — P. 605–615. — URL: <https://doi.org/10.1038/nnano.2007.300>.
4. Uptake of H<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> by Graphene / Anupama Ghosh [et al.] // The Journal of Physical Chemistry C. — 2008. — sep. — Vol. 112, no. 40. — P. 15704–15707. — URL: <https://doi.org/10.1021/jp805802w>.
5. Geim A. K., Novoselov K. S. The rise of graphene // Nature Materials. — 2007. — mar. — Vol. 6, no. 3. — P. 183–191. — URL: <https://doi.org/10.1038/nmat1849>.

6. Novoselov K. S. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films // *Science*. — 2004. — oct. — Vol. 306, no. 5696. — P. 666–669. — URL: <https://doi.org/10.1126/science.1102896>.
7. Mattausch Alexander, Pankratov Oleg. Density functional study of graphene overlayers on SiC // *physica status solidi (b)*. — 2008. — jul. — Vol. 245, no. 7. — P. 1425–1435. — URL: <https://doi.org/10.1002/pssb.200844031>.
8. Flexible Graphene Films via the Filtration of Water-Soluble Noncovalent Functionalized Graphene Sheets / Yuxi Xu [et al.] // *Journal of the American Chemical Society*. — 2008. — may. — Vol. 130, no. 18. — P. 5856–5857. — URL: <https://doi.org/10.1021/ja800745y>.
9. Processable aqueous dispersions of graphene nanosheets / Dan Li [et al.] // *Nature Nanotechnology*. — 2008. — jan. — Vol. 3, no. 2. — P. 101–105. — URL: <https://doi.org/10.1038/nnano.2007.451>.
10. Eda Goki, Fanchini Giovanni, Chhowalla Manish. Large-area ultrathin films of reduced graphene oxide as a transparent and flexible electronic material // *Nature Nanotechnology*. — 2008. — apr. — Vol. 3, no. 5. — P. 270–274. — URL: <https://doi.org/10.1038/nnano.2008.83>.
11. Katsnelson Mikhail I. Graphene: carbon in two dimensions // *Materials Today*. — 2007. — jan. — Vol. 10, no. 1-2. — P. 20–27. — URL: [https://doi.org/10.1016/s1369-7021\(06\)71788-6](https://doi.org/10.1016/s1369-7021(06)71788-6).
12. Functionalized Single Graphene Sheets Derived from Splitting Graphite Oxide / Hannes C. Schniepp [et al.] // *The Journal of Physical Chemistry B*. — 2006. — may. — Vol. 110, no. 17. — P. 8535–8539. — URL: <https://doi.org/10.1021/jp060936f>.
13. Structure and electronic properties of graphite nanoparticles / Odd E. Andersson [et al.] // *Physical Review B*. — 1998. — dec. — Vol. 58, no. 24. — P. 16387–16395. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.58.16387>.
14. Montoya Alejandro, Mondragón Fanor, Truong Thanh N. CO<sub>2</sub> adsorption on carbonaceous surfaces: a combined experimental and theoretical study // *Carbon*. — 2003. — jan. — Vol. 41, no. 1. — P. 29–39. — URL: [https://doi.org/10.1016/s0008-6223\(02\)00249-x](https://doi.org/10.1016/s0008-6223(02)00249-x).
15. Berger C. Electronic Confinement and Coherence in Patterned Epitaxial Graphene // *Science*. — 2006. — may. — Vol. 312, no. 5777. — P. 1191–1196. — URL: <https://doi.org/10.1126/science.1125925>.
16. Graphene-based composite materials / Sasha Stankovich [et al.] // *Nature*. — 2006. — jul. — Vol. 442, no. 7100. — P. 282–286. — URL: <https://doi.org/10.1038/nature04969>.
17. A Chemical Route to Graphene for Device Applications / Scott Gilje [et al.] // *Nano Letters*. — 2007. — nov. — Vol. 7, no. 11. — P. 3394–3398. — URL: <https://doi.org/10.1021/nl0717715>.
18. Detection of individual gas molecules adsorbed on graphene / F. Schedin [et al.] // *Nature Materials*. — 2007. — jul. — Vol. 6, no. 9. — P. 652–655. — URL: <https://doi.org/10.1038/nmat1967>.

19. Electromechanical Resonators from Graphene Sheets / J. S. Bunch [et al.] // *Science*. — 2007. — jan. — Vol. 315, no. 5811. — P. 490–493. — URL: <https://doi.org/10.1126/science.1136836>.
20. Graphene-Polypyrrole Nanocomposite: An Ideal Electroactive Material for High Performance Supercapacitors / Alagiri Mani [et al.] // *Graphene Materials*. — John Wiley & Sons, Inc., 2015. — apr. — P. 225–244. — URL: <https://doi.org/10.1002/9781119131816.ch7>.
21. Hierarchically aligned fibrous hydrogel films through microfluidic self-assembly of graphene and polysaccharides / Akhil Patel [et al.] // *Biotechnology and Bioengineering*. — 2018. — aug. — Vol. 115, no. 10. — P. 2654–2667. — URL: <https://doi.org/10.1002/bit.26801>.
22. CdS/Graphene Nanocomposite Photocatalysts / Qin Li [et al.] // *Advanced Energy Materials*. — 2015. — apr. — Vol. 5, no. 14. — P. 1500010. — URL: <https://doi.org/10.1002/aenm.201500010>.
23. Fabrication of microcellular polymer/graphene nanocomposite foams / Bin Shen [et al.] // *Polymer International*. — 2012. — sep. — Vol. 61, no. 12. — P. 1693–1702. — URL: <https://doi.org/10.1002/pi.4355>.
24. Jeong Young Gyu, An Ji-Eun. UV-cured epoxy/graphene nanocomposite films: preparation, structure and electric heating performance // *Polymer International*. — 2014. — feb. — Vol. 63, no. 11. — P. 1895–1901. — URL: <https://doi.org/10.1002/pi.4713>.
25. Superior Electrochemical Performance of Sulfur/Graphene Nanocomposite Material for High-Capacity Lithium-Sulfur Batteries / Bei Wang [et al.] // *Chemistry - An Asian Journal*. — 2012. — mar. — Vol. 7, no. 7. — P. 1637–1643. — URL: <https://doi.org/10.1002/asia.201200004>.
26. Polyoxometalate-Graphene Nanocomposite Modified Electrode for Electrocatalytic Detection of Ascorbic Acid / Weiyang Zhang [et al.] // *Electroanalysis*. — 2013. — nov. — Vol. 26, no. 1. — P. 178–183. — URL: <https://doi.org/10.1002/elan.201300343>.
27. Graphene Based Electrochemical Sensors and Biosensors: A Review / Yuyan Shao [et al.] // *Electroanalysis*. — 2010. — mar. — Vol. 22, no. 10. — P. 1027–1036. — URL: <https://doi.org/10.1002/elan.200900571>.
28. Removal of Organic Dyes in Environmental Water onto Magnetic-Sulfonic Graphene Nanocomposite / Sui Wang [et al.] // *CLEAN - Soil, Air, Water*. — 2013. — Vol. 41, no. 10. — P. 992–1001. — URL: <https://doi.org/10.1002/clen.201200460>.
29. The preparation and properties of polystyrene/functionalized graphene nanocomposite foams using supercritical carbon dioxide / Chaoqun Li [et al.] // *Polymer International*. — 2012. — nov. — Vol. 62. — P. 1077–1084. — URL: <https://doi.org/10.1002/pi.4394>.
30. Flexible Solid-State Supercapacitors with Enhanced Performance from Hierarchically Graphene Nanocomposite Electrodes and Ionic Liquid Incorporated Gel Polymer Electrolyte / Lanxiang Feng [et al.] // *Advanced Functional Materials*. — 2017. — nov. — Vol. 28, no. 4. — P. 1704463. — URL: <https://doi.org/10.1002/adfm.201704463>.

31. 2D-Aligned Graphene Sheets in Transparent Polyimide/Graphene Nanocomposite Films Based on Noncovalent Interactions Between Poly(amic acid) and Graphene Carboxylic Acid / Gwang Yeon Kim [et al.] // *Macromolecular Materials and Engineering*. — 2011. — nov. — Vol. 297, no. 4. — P. 303–311. — URL: <https://doi.org/10.1002/mame.201100211>.
32. Carbon Nanodots as Feedstock for a Uniform Hematite-Graphene Nanocomposite / Volker Strauss [et al.] // *Small*. — 2018. — nov. — Vol. 14, no. 51. — P. 1803656. — URL: <https://doi.org/10.1002/smll.201803656>.
33. Vertically oriented polyaniline-graphene nanocomposite based on functionalized graphene for supercapacitor electrode / Qiang Zhao [et al.] // *Journal of Applied Polymer Science*. — 2017. — jan. — Vol. 134, no. 19. — URL: <https://doi.org/10.1002/app.44808>.
34. Intrinsic flame-retardant urea formaldehyde/graphene nanocomposite foam: Structure and reinforcing mechanism / Buyong Wu [et al.] // *Polymer Composites*. — 2018. — sep. — Vol. 40, no. S1. — P. E811–E820. — URL: <https://doi.org/10.1002/pc.25028>.
35. Vacancy filling effect of graphene on photoluminescence behavior of ZnO/graphene nanocomposite / Eunsil Lee [et al.] // *Physica status solidi (RRL) - Rapid Research Letters*. — 2014. — aug. — Vol. 8, no. 10. — P. 836–840. — URL: <https://doi.org/10.1002/pssr.201409225>.
36. Charoeythornkhajhornchai Pollawat, Samthong Chavakorn, Somwangthanaroj Anongnat. Effect of graphene treated with cyclohexyl diamine by diazonium reaction on cure kinetics, mechanical, thermal, and physical properties of natural rubber/graphene nanocomposite foam // *Polymer Composites*. — 2018. — dec. — Vol. 40, no. S2. — P. E1766–E1776. — URL: <https://doi.org/10.1002/pc.25160>.
37. Marashdeh Wajeeh F., Longun Jimmy, Iroh Jude O. Relaxation behavior and activation energy of relaxation for polyimide and polyimide-graphene nanocomposite // *Journal of Applied Polymer Science*. — 2016. — apr. — Vol. 133, no. 28. — URL: <https://doi.org/10.1002/app.43684>.
38. Dhibar Saptarshi, Das Chapal Kumar. Silver nanoparticles decorated polypyrrole/graphene nanocomposite: A potential candidate for next-generation supercapacitor electrode material // *Journal of Applied Polymer Science*. — 2017. — jan. — Vol. 134, no. 16. — URL: <https://doi.org/10.1002/app.44724>.
39. Graphene-Based Nanocomposites for Energy Storage / Liwen Ji [et al.] // *Advanced Energy Materials*. — 2016. — jun. — Vol. 6, no. 16. — P. 1502159. — URL: <https://doi.org/10.1002/aenm.201502159>.
40. Bagchi Soumendu, Ke Changhong, Chew Huck Beng. Oxidation effect on the shear strength of graphene on aluminum and titanium surfaces // *Physical Review B*. — 2018. — nov. — Vol. 98, no. 17. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.98.174106>.
41. Westervelt R. M. Applied physics: Graphene Nanoelectronics // *Science*. — 2008. — apr. — Vol. 320, no. 5874. — P. 324–325. — URL: <https://doi.org/10.1126/science.1156936>.

42. Jin-Phillipp N. Y., Rühle M. Carbon nanotube/metal interface studied by cross-sectional transmission electron microscopy // *Physical Review B*. — 2004. — dec. — Vol. 70, no. 24. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.70.245421>.
43. Length effect of carbon nanotubes on the strengthening mechanisms in metal matrix composites / B. Chen [et al.] // *Acta Materialia*. — 2017. — nov. — Vol. 140. — P. 317–325. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2017.08.048>.
44. Strengthening and toughening mechanisms in graphene-Al nanolaminated composite micro-pillars / Siwen Feng [et al.] // *Acta Materialia*. — 2017. — feb. — Vol. 125. — P. 98–108. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2016.11.043>.
45. Atomic and electronic structure of simple metal/graphene and complex metal/graphene/metal interfaces / Lyudmyla Adamska [et al.] // *Physical Review B*. — 2012. — may. — Vol. 85, no. 19. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.85.195443>.
46. Olsen Thomas, Thygesen Kristian S. Random phase approximation applied to solids, molecules, and graphene-metal interfaces: From van der Waals to covalent bonding // *Physical Review B*. — 2013. — feb. — Vol. 87, no. 7. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.87.075111>.
47. Effects of shape and flexibility of conductive fillers in nanocomposites on percolating network formation and electrical conductivity / Seulki Kwon [et al.] // *Physical Review E*. — 2016. — mar. — Vol. 93, no. 3. — URL: <https://doi.org/10.1103/physreve.93.032501>.
48. moussa Abdellah Ait, Jassemnejad Bahaeddin. Optimizing thermal conductivity in functionalized macromolecules using Langevin dynamics and the globalized and bounded Nelder-Mead algorithm // *Physical Review E*. — 2014. — may. — Vol. 89, no. 5. — URL: <https://doi.org/10.1103/physreve.89.053313>.
49. Moussa Abdellah Ait, Mullen Kieran. Using normal modes to calculate and optimize thermal conductivity in functionalized macromolecules // *Physical Review E*. — 2011. — may. — Vol. 83, no. 5. — URL: <https://doi.org/10.1103/physreve.83.056708>.
50. Hu Lin, Desai Tapan, Keblinski Pawel. Determination of interfacial thermal resistance at the nanoscale // *Physical Review B*. — 2011. — may. — Vol. 83, no. 19. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.83.195423>.
51. Kumar Sandeep, Hembram K. P. S. S., Waghmare Umesh V. Intrinsic buckling strength of graphene: First-principles density functional theory calculations // *Physical Review B*. — 2010. — sep. — Vol. 82, no. 11. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevb.82.115411>.
52. Born Max, Wolf Emil. *Principles of Optics*. — Oxford : Pergamon Press, 1969. — 720 p.
53. Gadomskii O. N., Shalin A. S. Effect of optical blooming of a nanocrystal monolayer and the interface between two media // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. — 2007. — oct. — Vol. 105, no. 4. — P. 761–773. — URL: <http://dx.doi.org/10.1134/S106377610710010X>.

**Information about authors:**

**Konstantin Konstantinovich Altunin** – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Physics and Technical Disciplines of the Ulyanovsk State Pedagogical University, Ulyanovsk, Russia.

E-mail: kostya.altunin@mail.ru

ORCID iD  0000-0002-0725-9416

Web of Science ResearcherID  I-5739-2014

SCOPUS ID  57201126207

**Yulia Aleksandrovna Kucherova** — student of the Faculty of Physics, Mathematics and Technological Education of the Ulyanovsk State Pedagogical University, Ulyanovsk, Russia.

E-mail: melneko@mail.ru

ORCID iD  0000-0002-9759-839X

Web of Science ResearcherID  ABD-4970-2020

УДК 373.5  
ББК 74.262.0  
ГРНТИ 14.25.09  
ВАК 13.00.02

## Разработка системы проверки знаний в дистанционном курсе по оптике нанокompозитных материалов в системе управления обучением MOODLE

Е. О. Сорокина  <sup>1</sup>

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», 432071, Ульяновск, Россия

Поступила в редакцию 3 февраля 2021 года  
После переработки 16 марта 2021 года  
Опубликована 12 июня 2021 года

---

**Аннотация.** Рассматривается результат разработки дистанционного курса по оптике нанокompозитных материалов, посвящённого изучению физических основ классической, нелинейной и квантовой оптики нанокompозитных материалов. Дистанционный курс по оптике нанокompозитных материалов создан в системе управления обучением MOODLE на образовательном портале педагогического университета. Описаны результаты разработки модульной структуры курса, теоретических элементов и элементов контроля знаний по оптике нанокompозитных материалов.

**Ключевые слова:** оптика, нанокompозитный материал, дистанционный курс, система управления обучением

PACS: 01.40.-d

---

### Введение

В настоящее время интенсивно развивается система дистанционного сопровождения изучения курсов физико-математической тематики в образовательных программах университетов. В связи с развитием технологий смешанного обучения и эпидемиологической обстановкой становится актуальной задача создания дистанционного курса по оптике нанокompозитных материалов.

Целью исследования является создание дистанционного курса по оптике нанокompозитных материалов в системе управления обучением MOODLE.

Задачей исследования является разработка элементов дистанционного курса по оптике нанокompозитных материалов в системе управления обучением MOODLE.

Объектом исследования являются курс оптики нанокompозитных материалов.

Предметом исследования является процесс создания дистанционного курса по оптике нанокompозитных материалов.

---

<sup>1</sup>E-mail: elena2000sor@mail.ru

Гипотеза исследования состоит в том, что если создать и использовать дистанционный курс “Оптика нанокompозитных материалов”, основанный на комбинации теоретических методов и численных методов в процессе изучения классической, квантовой, нелинейной оптики нанокompозитных материалов, то можно повысить познавательный интерес у студентов университетов к курсу по оптике нанокompозитных материалов и реализовать систему смешанного обучения оптике нанокompозитных материалов.

В качестве методов исследования используется анализ теоретических материалов по оптике нанокompозитных сред, синтез различных концепций описания физических процессов оптики нанокompозитных материалов, компьютерное моделирование простых дисперсионных зависимостей оптических характеристик нанокompозитных материалов, проектирование дистанционного курса.

В качестве материалов исследования используются теоретические материалы по оптике нанокompозитных материалов.

## Обзор работ по оптике нанокompозитных материалов

Композиты обычно создаются путём встраивания оптически функциональной фазы в обрабатываемый прозрачный материал матрицы. Оптические свойства могут быть использованы в более технологически важных формах, таких как плёнки и волокна.

Нанокompозитные материалы — это среды, содержащие домены или включения нанометрового размера. Добавление гостевого материала к основной матрице может привести к значительному улучшению и модификации их физических свойств по сравнению с объёмным материалом. Рассеивание неорганических или органических наночастиц в оптическом материале вызывает дополнительную реакцию на падающий свет. В результате могут быть достигнуты высокоэффективные фотонные характеристики с экологически стабильными оптическими характеристиками. Это, в свою очередь, является идеальным исходным продуктом для множества высококачественных оптических компонентов. Волокна, призмы, линзы, фильтры, поляризаторы, модуляторы — это лишь несколько примеров.

Другим примером привлекательного применения нанокompозитов является их использование для выравнивания поверхности жидких кристаллов. В сочетании с техникой фотоориентации и инъекционной печатью нанокompозиты можно использовать для достижения желаемых распределений энергии фиксации и угла предварительного наклона жидкого кристалла. Это позволяет разрабатывать уникальные электрически настраиваемые оптические компоненты, такие как призмы и устройства управления лучом [1–3]. Более того, некоторые из этих оптических компонентов, в частности массив настраиваемых микролинз со сверхнизким энергопотреблением, которые могут служить объективом для микродисплея, расположенного в непосредственной близости от глаза, например такие, которые встроены в контактные линзы или очки, в настоящее время не имеют аналогов.

В статье [3] изучено формирование желаемого распределения директора жидкого кристалла за счёт использования неоднородного закрепления и угла предварительного наклона для электрически управляемых дифракционных оптических элементов. Такие жидкокристаллические дифракционные оптические элементы могут иметь высокую периодичность и дифракционную эффективность. В то же время они лишены конструктивных закономерностей, например периодическое расположение электродов или отклонения толщины, которые оказывают нежелательное влияние на дифракционные характеристики жидкокристаллических дифракционных оптических элементов других типов. Сосредотачиваются на оценке потенциальных функциональных возможностей жидкокристаллических дифракционных оптических элементов с неоднородной юстировкой. Рассмотрены причины, вызывающие ограничение дифракционной эффектив-

ности и периодичности жидкокристаллических дифракционных оптических элементов. Обсуждаются подходы к улучшению характеристик жидкокристаллических дифракционных оптических элементов.

Современные оптические системы предъявляют очень строгие требования к характеристикам, размеру и стоимости. Размер часто является наиболее важным фактором, особенно в портативных системах, что требует сложной конструкции для достижения желаемых характеристик. Однако существующие конструкции уже работают очень близко к физическим пределам, и дальнейшего прогресса трудно достичь, изменяя только сложность конструкции. Другой способ повышения производительности — адаптировать оптические свойства материалов к конкретному применению. Класс новых настраиваемых материалов, которые позволяют изменять оптические свойства и обещают преодолеть многие из внутренних недостатков полимеров, представляют собой нанокompозиты. Однако, несмотря на значительные прошлые исследовательские усилия, эти типы материалов в значительной степени недостаточно используются в оптических системах.

Нанокompозиты с заданными оптическими свойствами могут предоставить новую степень свободы для оптического дизайна. Однако, несмотря на свой потенциал, эти материалы остаются неиспользованными в объёмных оптических приложениях. В статье [4] исследуются условия, при которых они могут быть использованы для таких приложений, используя теорию Ми, теории эффективных сред и численное моделирование на основе метода конечных элементов. В статье [4] показано, что из-за рассеяния необходимо различать различные режимы эффективной среды, и что объёмные материалы могут быть реализованы только в определенном диапазоне параметров. Анализ также позволяет количественно оценить диапазон применимости различных теорий об эффективной среде и определить правила проектирования того, как свободные параметры материала должны быть скорректированы для конкретных приложений.

Оптические полимеры охватывают лишь довольно узкий диапазон оптических свойств. Это ограничивающий фактор при разработке оптических систем на основе полимеров, таких как камеры смартфонов. Более того, это также создает проблему для фемтосекундной двухфотонной литографии, которая представляет собой новейшую технологию для трёхмерной печати высококачественной оптики из фотополимеров. Чтобы преодолеть ограничения обычных полимеров, мы вводим наночастицы чернил на основе широко используемых фотополимеров IP-DIP и IP-S в качестве полимерной матрицы и наночастиц диоксида циркония. В статье [5] показано, что показатель преломления и дисперсия этих наночастиц могут быть целенаправленно настроены путём изменения составляющих материалов и объёмной доли наночастиц. Кроме того, продемонстрировано пригодность наночернил для оптических применений путём трёхмерной печати одиночных микролинз и ахроматического дублета Фраунгофера из нескольких материалов. Результаты подтверждают, что нанокompозиты расширяют диапазон оптических свойств, доступных для систем на основе полимеров, и позволяют создавать специальные оптические материалы.

Магнитные композитные материалы бросают вызов традиционным материалам в широком спектре приложений, таких как трансформаторы, датчики и электродвигатели. В работе [6] путём исследования диэлектрической проницаемости и спектров магнитной проницаемости легированной серебром магнитной нанокompозитной системы исследуется изменение эффективного показателя преломления с частотой для различных факторов заполнения. Обнаружено, что значение резонансной частоты уменьшается с увеличением коэффициента заполнения. Изучается также поляритонная дисперсия системы. Это исследование нанокompозитной системы может быть использовано при разработке современных оптических устройств.

Наноккомпозит — это матрица, в которую были добавлены наночастицы для улучшения определённых свойств материала. Свойства наноккомпозитов побудили исследователей и компаний к разработке эффективных волноводов и других новых устройств оптической связи [7, 8]. В последнее время магнитные наноккомпозиты интенсивно изучаются в связи с их применением в различных областях [9, 10]. Композит, состоящий из ферромагнитных однодоменных наночастиц железа, кобальта или никеля в металлической, полупроводниковой или изолирующей матрице, демонстрирует исключительные магнитные и транспортные свойства.

Фотонные наноккомпозитные материалы обычно конструируются путем встраивания оптически функционального наноразмерного гостевого материала (например, наночастиц, нанокристаллов и молекул) в оптически прозрачную матрицу-хозяин, такую как органические (например, (фото) полимеры, смеси полимеров, жидкие кристаллы) или неорганические твёрдые вещества (например, стекла и керамика). Добавление гостевого материала к матрице-хозяину может привести к значительному улучшению и модификации их механических, термических, транспортных и оптических свойств по сравнению с объёмными материалами. В результате могут быть достигнуты высокоэффективные фотонные функции с экологически стабильными оптическими характеристиками. Кроме того, наноккомпозитные материалы могут быть адаптированы путем управления их линейными оптическими свойствами, такими как показатель преломления и поглощения, а также их лазерными, электрооптическими и нелинейно-оптическими свойствами. Например, включение жидкокристаллических капель в полимеры даёт электрически регулируемые характеристики светорассеяния, идеально подходящие для дисплеев и оптических переключателей. Диспергирование неорганических или органических наночастиц в оптических материалах приводит к сильному отклику на падающий свет. Действительно, сегнетоэлектрические наночастицы в холестерических жидких кристаллах усиливают электрооптический отклик смеси. В фотополимерах наночастицы делают возможным формирование высококонтрастной голографической решётки, которая может оказаться полезной для таких приложений, как оптические элементы и хранение данных. Более того, наночастицы, диспергированные в фотополимере, могут быть собраны с помощью света, обеспечивая создание материалов с многомерной структурой, очень актуальных для фотонных и электронных приложений. Эффекты локального поля в наноструктурированных материалах могут обеспечить значительное усиление нелинейно-оптического отклика и улучшение свойств усиления света. Поскольку наноккомпозитные материалы представляют собой новый метод улучшения экологической устойчивости материалов, а также интересных оптических свойств, они должны открыть новые возможности для применения в фотонике.

В статье [11] исследованы оптические свойства наноккомпозитных материалов на основе плазмонных металлических сферических наночастиц. Авторы сравнили четыре различные эффективные теории, которые учитывают дисперсию размеров, взаимодействие между наночастицами и внешний размерный эффект для расчёта эффективного показателя преломления наночастиц золота, серебра и меди в полимере. Показано, что распределение по размерам вызывает неоднородное уширение и изменение амплитуды плазмонной полосы. Наименьший сдвиг резонансных характеристик наблюдается для наноккомпозита на основе меди по всем эффективным теориям. Показано, что один и тот же наноккомпозитный материал, но с другими параметрами (размером и концентрацией включений) может быть описан различными эффективными теориями.

В статье [12] содержится обзор некоторых недавних исследований, направленных на понимание физических процессов, определяющих линейные и нелинейные оптические свойства наноккомпозитных материалов. Одним из результатов этого исследования является предсказание и экспериментальная проверка того, что при надлежащих услови-

ях два материала могут быть объединены таким образом, что нелинейная восприимчивость композита превосходит нелинейную восприимчивость составляющих материалов. В статье [12] представлен обзор различных геометрических структур композитных материалов. Общий подход к разработке нелинейно-оптических материалов предполагает поиск материалов, которые на молекулярном уровне обладают желаемыми нелинейно-оптическими свойствами. Альтернативный подход, который изучен, предполагает объединение известных материалов в композитный материал. В надлежащих условиях этот композитный материал мог бы сочетать в себе более желательные свойства исходных материалов или, в идеале, мог бы обладать свойствами, превосходящими свойства исходных материалов.

Проведённый анализ научной литературы по оптике нанокompозитных материалов показал существование возрастающих потребностей в создании курсов по оптике нанокompозитных материалов для различных уровней образования.

## **Результаты разработки дистанционного курса по оптике нанокompозитных материалов в системе управления обучением MOODLE**

В работе рассматривается технология создания дистанционного курса по оптике нанокompозитных материалов в системе управления обучением MOODLE. Применение формата MOODLE на проблемно-ориентированной основе обеспечивает прозрачность результатов, включая тестирование в формате активного, операционального, рефлексивного обучения.

Под проектированием дистанционного курса по оптике нанокompозитных материалов понимают процесс разработки дистанционного курса, в котором активно используются автоматизированные методы контроля в ходе продвижения при изучении курса по оптике нанокompозитных материалов. Основные задачи изучения курса по оптике нанокompозитных материалов состоят в развитии логики теоретического мышления, интуиции, творческих способностей, овладении системой знаний и умений по оптике нанокompозитных материалов и наноструктур. Основной подход к изучению оптики нанокompозитных материалов с использованием информационных технологий заключается в увеличении визуально воспринимаемой студентом информации посредством использования дистанционного курса в процессе изучения оптики нанокompозитных материалов в университете. Структура дистанционного курса по оптике нанокompозитных материалов включает в себя специальным образом сформированные модули, содержащие тематические связанные материалы и элементы контроля в виде тестов, задач и заданий. На первом этапе создания дистанционного курса производится определение целей и задач, которые необходимо реализовать в процессе проектирования дистанционного курса. На втором этапе создания дистанционного курса производится разработка структуры дистанционного курса в строгом соответствии с выбранной тематикой и объёмом курса по оптике нанокompозитных материалов. На третьем этапе создания дистанционного курса по оптике нанокompозитных материалов производится разработка содержания блоков дистанционного курса по тематическим модулям и темам. На четвёртом этапе создания дистанционного курса производится визуализация полученной структуры в наглядном виде для планомерного контроля наполнения различных модулей и тем курса по оптике нанокompозитных материалов. На пятом этапе создания дистанционного курса производится поиск программного обеспечения для разработки дистанционного курса и его создание. Дизайн дистанционного курса выполнен средствами системы управления обучением MOODLE. На шестом этапе создания дистанционного курса производится разработка методических рекомендаций для

пользователя ресурса. На седьмом этапе создания дистанционного курса производится наполнение модулей элементами и отладка элементов. На восьмом этапе создания дистанционного курса производится разработка банка тестовых вопросов и заданий по курсу по оптике нанокompозитных материалов, создание банка тестов, компоновка тестов по темам и модулям. На девятом этапе создания дистанционного курса производится апробация дистанционного курса в учебном процессе. На десятом этапе создания дистанционного курса производится корректирование содержания и выявление недостатков дистанционного курса.

Использование дистанционных курсов решает проблему систематизации теоретического материала, задач и заданий, а также обеспечивает планомерную выдачу заданий, последовательный контроль и даёт рациональный подход в преподавании оптики нанокompозитных материалов. Применение дистанционного курса по оптике нанокompозитных материалов обеспечивает обучение студентов университета в удобном темпе и выбранном уровне материала. Дистанционный курс по оптике нанокompозитных материалов позволяет успешно решить задачу построения индивидуальных образовательных траекторий для студентов.

Дистанционный курс по оптике нанокompозитных материалов представляет собой структурированную совокупность гипертекстовых страниц, в которых заключен необходимый теоретический материал по оптике нанокompозитных материалов, справочные таблицы, рисунки, справочные материалы по оптике нанокompозитных материалов, тесты и элементы навигации средствами системы управления обучением MOODLE. Закрывая и открывая модули можно поддерживать темп продвижения по курсу по оптике нанокompозитных материалов средствами системы управления обучением MOODLE. Для более глубокого изучения тем можно воспользоваться источниками, приведёнными в списке рекомендуемой литературы, и гиперссылками на внутренние и внешние источники информации в глобальной сети Интернет. По основным терминам и определениям дистанционный курс по оптике нанокompозитных материалов содержит гиперссылки на статьи глоссария. Весь теоретический материал по оптике нанокompозитных материалов можно разделить на темы, а каждая из тем, в свою очередь, делится на модули. В свою очередь модули могут подразделяться на подтемы. В дистанционном курсе по оптике нанокompозитных материалов приведены примеры решения задач, задачи с ответами для самостоятельного решения и задачи без ответов для проведения проверочных и контрольных работ. Каждая изучаемая тема в дистанционном курсе по оптике нанокompозитных материалов включает элементы, содержащие следующие учебные элементы: необходимый теоретический материал, дидактические материалы к занятиям, ряд заданий для самостоятельной работы, гиперссылки на рекомендуемые учебные издания и учебники по оптике нанокompозитных материалов, гиперссылки на внешние электронные источники информации.

Можно подчеркнуть, что специфика курса по оптике нанокompозитных материалов осуществляется с помощью компьютера с выходом в Интернет. Возможно применение синхронной и асинхронной методик дистанционного обучения в рамках курса дистанционного курса по оптике нанокompозитных материалов. Существуют особые формы занятий, применяемых в дистанционном обучении. К ним можно отнести чат-занятия и веб-занятия, то есть занятия с использованием современных коммуникационных технологий. Эти типы дистанционных занятий подразумевают текстовое, голосовое или видео-общение при изучении дистанционного курса. Примером занятия такого типа может послужить проведение видеоконференции для обсуждения заданий дистанционного курса дистанционного курса по оптике нанокompозитных материалов. Эта форма наиболее приближена к очному обучению, где учитель физики в режиме реального времени передаёт информацию ученикам, задаёт и отвечает на вопросы по заданиям дистан-

ционного курса по оптике нанокomпозитных материалов. Для осуществления данного вида уроков существует множество программ таких, как Zoom, Skype для осуществления видеосвязи, интерактивные доски для совместных записей в ходе обсуждения решения задач по оптике нанокomпозитных материалов. Современные платформы позволяют записывать занятия, чтобы можно было в удобное время пересмотреть, повторить материал, что является несомненным плюсом, по сравнению с традиционным методом аудиторного обучения. Когда невозможно провести онлайн занятия, используется методика асинхронного дистанционного обучения. При применении данной методики больше ответственности за прохождение обучения возлагается на самостоятельность учащегося. На первый план выдвигается самообучение, индивидуальный темп обучения, а также регулирования темпа ученика. Ещё одним положительным моментом дистанционной формы обучения оптике нанокomпозитных материалов является то, что ученики могут выполнять задания в удобное для них время с необходимыми перерывами. Учитель может своевременно отслеживать продвижение своих учащихся.

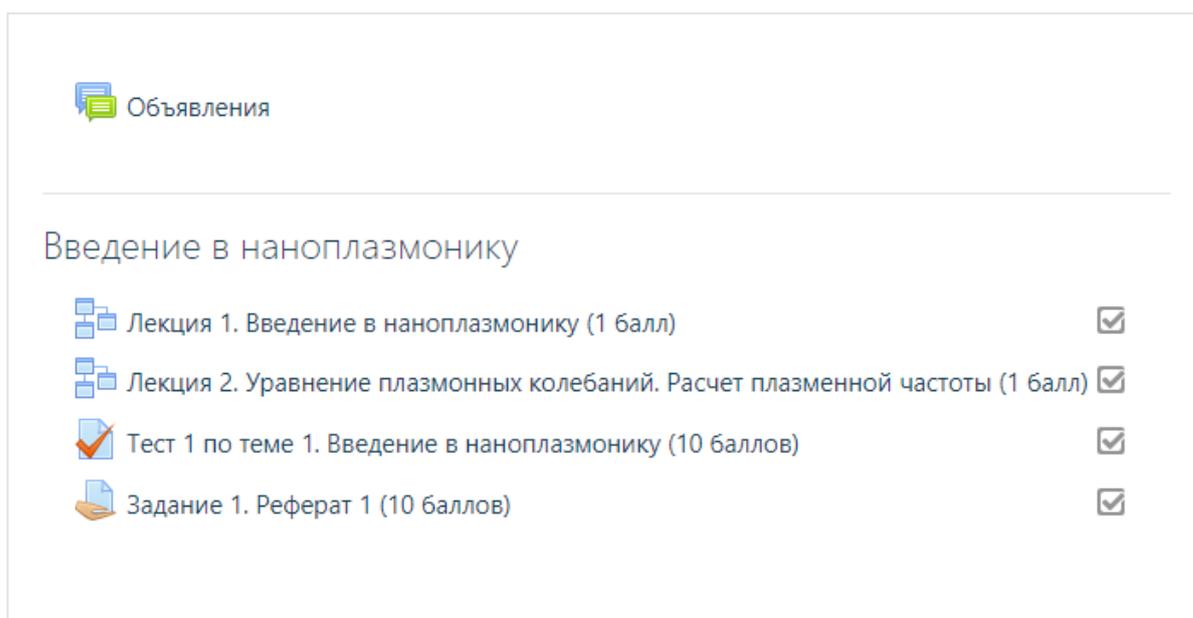


Рис. 1. Часть элементов одной из тем дистанционного курса по оптике нанокomпозитных материалов в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 1 приведено изображение части элементов одной из тем дистанционного курса по оптике нанокomпозитных материалов, созданного в системе управления обучением MOODLE на образовательном портале университета.

Рассмотрим результат разработки некоторых элементов для контроля знаний в составе дистанционного курса по оптике нанокomпозитных материалов в системе управления обучением MOODLE.

Каждая изучаемая тема в дистанционном курсе по оптике нанокomпозитных материалов включает элементы, содержащие следующие контролируемые элементы: тестовые задания для организации промежуточного и итогового контроля по оптике нанокomпозитных материалов. Правильная подборка физических задач и заданий в каждом тематическом модуле курса поможет закрепить изученный материал и подготовить студента с помощью курса по оптике нанокomпозитных материалов.

На первом этапе создания банка заданий и вопросов производится определение целей и задач, для которых будет использоваться банка заданий и вопросов. Банк вопросов, предназначенный для стандартного тестового контроля, и банк вопросов, предназначенный для тестового контроля заданий разного уровня и тематического содержания,

будут существенно различаться. На втором этапе создания банка заданий и вопросов производится разработка тематической структуры банка заданий и вопросов в соответствии с выбранными целями и задачами. На третьем этапе создания банка заданий и вопросов производится разработка содержания тестовых заданий и вопросов в составе банка вопросов и заданий. На четвертом этапе создания банка заданий и вопросов производится наполнение банка вопросов и заданий различными типами вопросов и заданий. На пятом этапе создания банка заданий и вопросов производится создание тестов в составе моделей и тем курса по оптике нанокompозитных материалов. На шестом этапе создания банка заданий и вопросов производится отладка тестов в составе дистанционного курса по оптике нанокompозитных материалов. На седьмом этапе создания банка заданий и вопросов производится разработка методических рекомендаций по использованию тестов в составе моделей и тем курса по оптике нанокompозитных материалов. На восьмом этапе создания банка заданий и вопросов производится апробация банка тестовых вопросов и заданий по оптике нанокompозитных материалов в учебном процессе. На девятом этапе создания банка заданий и вопросов производится корректирование содержания и выявление недостатков банка тестовых вопросов и заданий в составе дистанционного курса по оптике нанокompозитных материалов.

Меню

Тест 1 по теме 1. Введение в наноплазмонику (10 баллов) / Просмотр

Вопрос 1  
Пока нет ответа  
Балл: 2,00  
Отметить вопрос  
Редактировать вопрос

Поверхностные плазмоны — это кванты колебаний плотности свободных электронов металла вдоль его границы с диэлектриком.

Выберите один ответ:

Верно

Неверно

Следующая страница

← Лекция 2. Уравнение плазмонных колебаний. Расчет

Рис. 2. Вопрос 1 из первого теста в составе дистанционного курса по оптике нанокompозитных материалов в системе дистанционного обучения на платформе MOODLE.

На рис. 2 приведено изображение страницы задания с вопросом 1 из первого теста в составе дистанционного курса по оптике нанокompозитных материалов, созданного в системе управления обучением в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 3 приведено изображение страницы задания с вопросом 2 из первого теста в составе дистанционного курса по оптике нанокompозитных материалов, созданного в системе управления обучением в системе управления обучением MOODLE.

Вопрос **2**  
Пока нет ответа  
Балл: 1,00  
Отметить вопрос  
Редактировать вопрос

Плазмонный резонанс возникает при несовпадении собственной частоты колебания электронов с частотой падающего излучения?

Ответ:

Предыдущая страница      Следующая страница

← Лекция 2. Уравнение плазмонных колебаний. Расчет плазменной частоты (1 балл)

Рис. 3. Вопрос 2 из первого теста в составе дистанционного курса по оптике нанокomпозитных материалов в системе дистанционного обучения на платформе MOODLE.

На рис. 4 приведено изображение страницы задания с вопросом 3 из первого теста в составе дистанционного курса по оптике нанокomпозитных материалов, созданного в системе управления обучением в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 5 приведено изображение страницы задания с вопросом 4 из первого теста в составе дистанционного курса по оптике нанокomпозитных материалов, созданного в системе управления обучением в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 6 приведено изображение страницы задания с вопросом 5 из первого теста в составе дистанционного курса по оптике нанокomпозитных материалов, созданного в системе управления обучением в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 7 приведено изображение страницы задания с вопросом 6 из первого теста в составе дистанционного курса по оптике нанокomпозитных материалов, созданного в системе управления обучением в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 8 приведено изображение страницы задания с вопросом 7 из первого теста в составе дистанционного курса по оптике нанокomпозитных материалов, созданного в системе управления обучением в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 9 приведено изображение страницы задания с вопросом 8 из первого теста в составе дистанционного курса по оптике нанокomпозитных материалов, созданного в системе управления обучением в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 10 приведено изображение страницы задания с вопросом 9 из первого теста в составе дистанционного курса по оптике нанокomпозитных материалов, созданного в системе управления обучением в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 11 приведено изображение страницы задания в виде реферата в составе дистанционного курса по оптике нанокomпозитных материалов, созданного в системе

Вопрос **3**  
Пока нет ответа  
Балл: 1,00  
Отметить вопрос  
Редактировать вопрос

Поляритоны – это поверхностные плазмоны которые взаимодействуют с фотонами.

Выберите один ответ:

Верно  
 Неверно

Предыдущая страница      Следующая страница

← Лекция 2. Уравнение плазмонных колебаний. Расчет плазменной частоты (1 балл)

Рис. 4. Вопрос 3 из первого теста в составе дистанционного курса по оптике нанокompозитных материалов в системе дистанционного обучения на платформе MOODLE.

Вопрос **4**  
Пока нет ответа  
Балл: 1,00  
Отметить вопрос  
Редактировать вопрос

Свет с частотой ниже плазменной будет проходить через твёрдое тело.

Выберите один ответ:

Верно  
 Неверно

Предыдущая страница      Следующая страница

← Лекция 2. Уравнение плазмонных колебаний. Расчет плазменной частоты (1 балл)

Рис. 5. Вопрос 4 из первого теста в составе дистанционного курса по оптике нанокompозитных материалов в системе дистанционного обучения на платформе MOODLE.

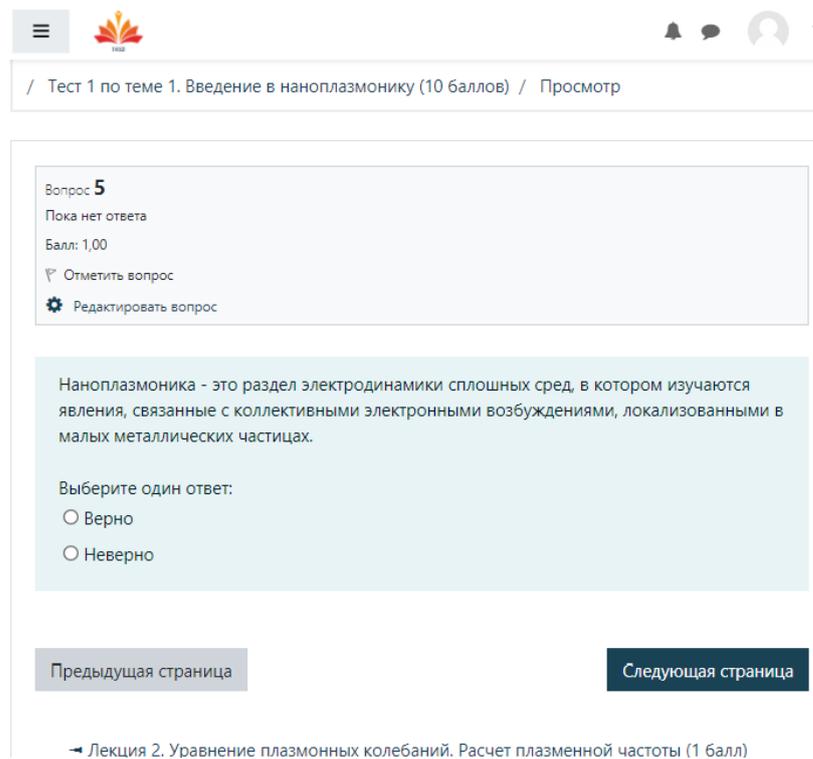


Рис. 6. Вопрос 5 из первого теста в составе дистанционного курса по оптике нанокompозитных материалов в системе дистанционного обучения на платформе MOODLE.

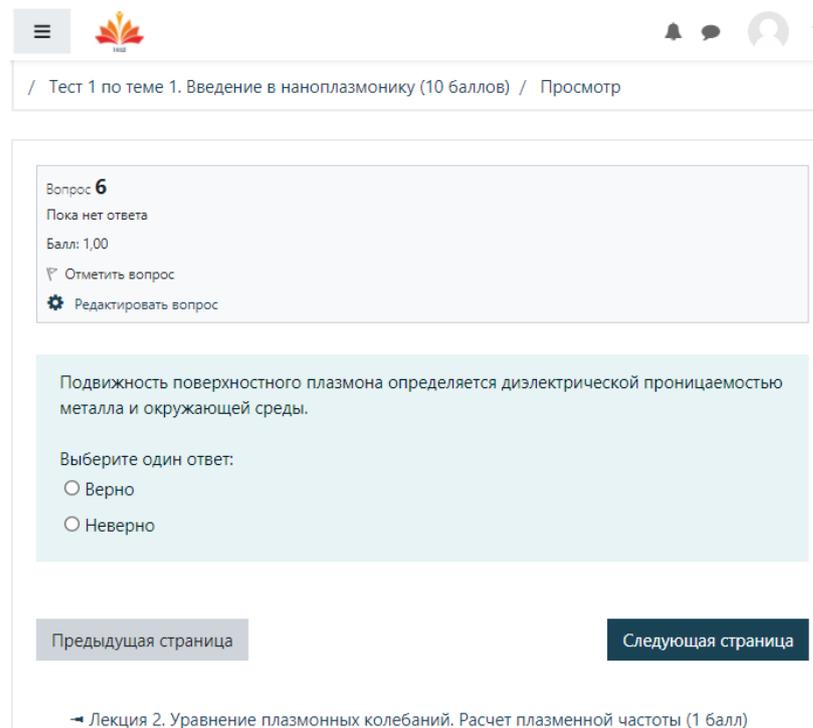


Рис. 7. Вопрос 6 из первого теста в составе дистанционного курса по оптике нанокompозитных материалов в системе дистанционного обучения на платформе MOODLE.

управления обучением в системе управления обучением MOODLE.

В результате выполнения самостоятельной части работы создан дистанционный курс по оптике нанокompозитных материалов на платформе MOODLE. Разработанный дистанционный курс по оптике нанокompозитных материалов позволяет реализовать непре-

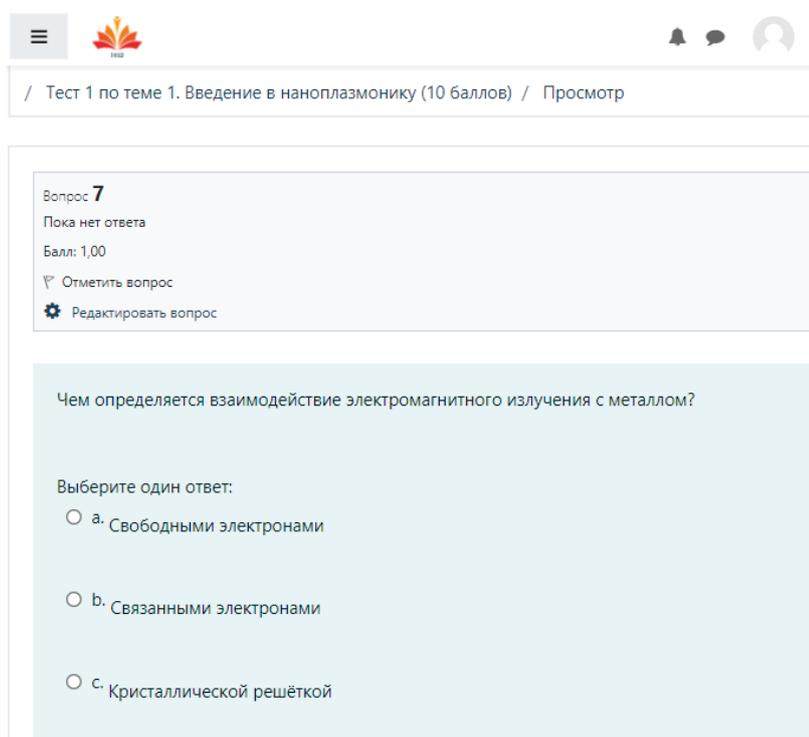


Рис. 8. Вопрос 7 из первого теста в составе дистанционного курса по оптике нанокompозитных материалов в системе дистанционного обучения на платформе MOODLE.

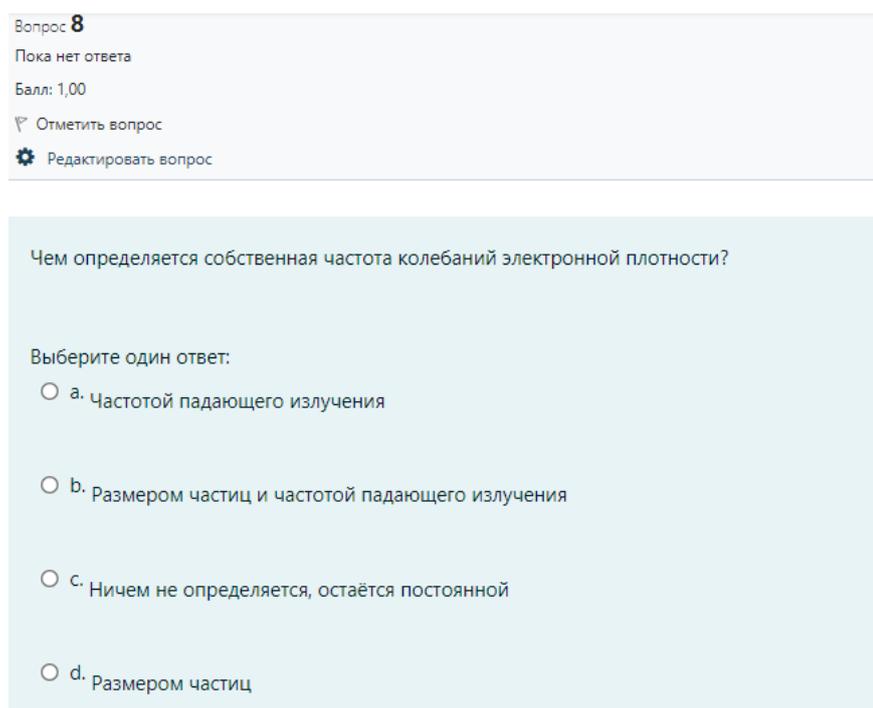


Рис. 9. Вопрос 8 из первого теста в составе дистанционного курса по оптике нанокompозитных материалов в системе дистанционного обучения на платформе MOODLE.

рывное информационное сопровождение изучения оптики нанокompозитных материалов. Разработанный дистанционный курс по оптике нанокompозитных материалов в системе управления обучением MOODLE содержит элементы для контроля знаний по оптике нанокompозитных материалов.

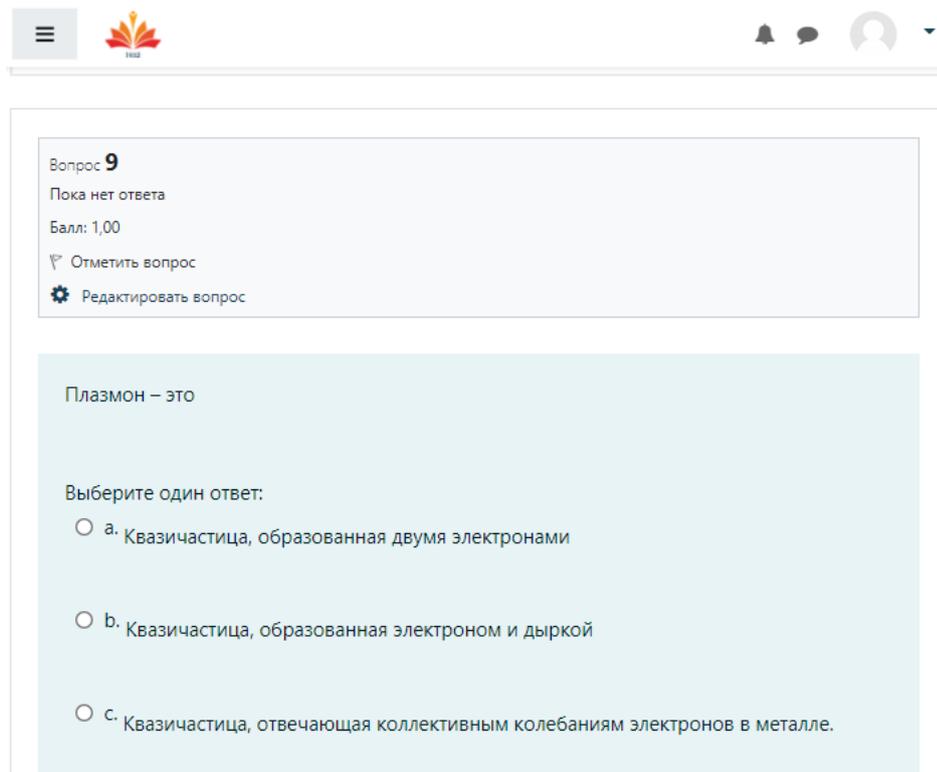


Рис. 10. Вопрос 9 из первого теста в составе дистанционного курса по оптике нанокompозитных материалов в системе дистанционного обучения на платформе MOODLE.

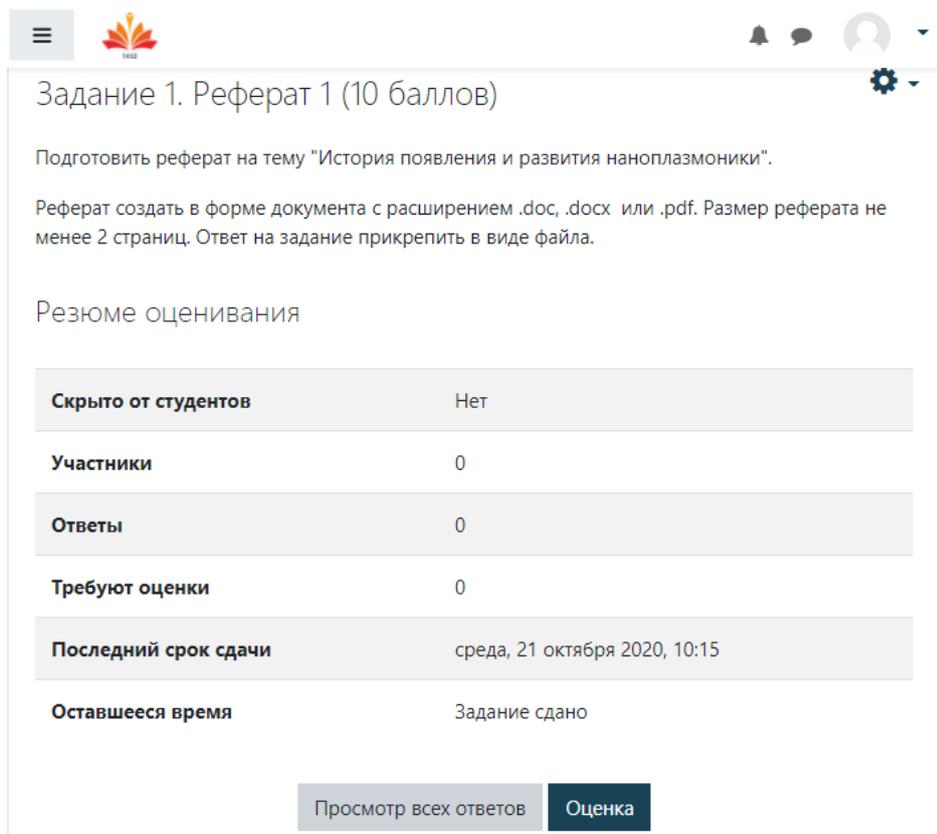


Рис. 11. Задание в виде реферата в составе дистанционного курса по оптике нанокompозитных материалов в системе дистанционного обучения на платформе MOODLE.

## Заключение

В настоящей работе проведено всестороннее исследование дистанционного курса по оптике нанокompозитных материалов в системе управления обучением MOODLE. В работе описан результат разработки дистанционного курса по оптике нанокompозитных материалов, который готов к началу использования в учебном процессе в университете, позволяет автоматизировать проверку знаний по оптике нанокompозитных материалов. Дистанционный курс по оптике нанокompозитных материалов, созданный в системе управления обучением MOODLE, способствует систематизации хранения учебного материала по оптике нанокompозитных материалов. При изучении курса оптики нанокompозитных материалов система дистанционного обучения MOODLE привносит то, что кроме основного курса по изучаемой дисциплине, используется материал для подготовки в домашних условиях, который позволяет расширить учебное содержание, а также провести дифференциацию учебного материала в соответствии с индивидуальными потребностями и запросами студентов, изучающих курс. Система управления обучением MOODLE позволяет открывать и закрывать тематические модели в соответствии со временем изучения, что позволяет поддерживать необходимый темп продвижения по курсу оптики нанокompозитных материалов. В качестве подтверждения гипотезы исследования спроектирован дистанционный курс по оптике нанокompозитных материалов, основанный на комбинации теоретических методов и численных методов в процессе изучения оптики нанокompозитных материалов, позволяющий повысить познавательный интерес студентов к оптике нанокompозитных материалов по традиционной, смешанной и дистанционной формам обучения с применением компьютеров. Дистанционный курс по оптике нанокompозитных материалов, созданный в системе управления обучением MOODLE, способен стать эффективным помощником, автоматизирующим наиболее трудоёмкие элементы труда преподавателя в процессе преподавания учебных дисциплин физико-математической направленности.

Разработан оригинальный дистанционный курс по оптике нанокompозитных материалов, который готов к началу использования в учебном процессе педагогического университета по специальностям физико-математического профиля подготовки. Созданный в работе дистанционный курс по оптике нанокompозитных материалов позволит эффективно планировать, организовывать и проводить изучение теоретического материала курса по оптике нанокompозитных материалов в дистанционной или смешанной форме обучения. Разработанный дистанционный курс по оптике нанокompозитных материалов может занять особое место среди дистанционных курсов по физико-математической тематике, предназначенных для студентов физико-математических профилей подготовки университетов. Использование дистанционного курса по оптике нанокompозитных материалов способствует интенсификации учебного процесса и более осмысленному изучению материала, приобретению навыков самоорганизации и превращению систематических знаний в системные, помогает развитию познавательной деятельности обучаемых и интереса к предмету.

Гипотеза исследования состоящая в том, что если создать и использовать дистанционный курс по оптике нанокompозитных материалов, основанный на комбинации теоретических методов и численных методов в процессе изучения классической, квантовой, нелинейной оптики нанокompозитных материалов, то можно повысить познавательный интерес у студентов университетов к курсу по оптике нанокompозитных материалов и реализовать систему смешанного обучения оптике нанокompозитных материалов, подтверждена полностью.

По итогам разработки дистанционного курса по оптике нанокompозитных материалов в системе управления обучением MOODLE можно сделать вывод о наличии элементов для эффективного контроля знаний по оптике нанокompозитных материалов.

**Список использованных источников**

1. Liquid crystal light deflecting devices based on nonuniform anchoring / S. Valyukh [et al.] // *Applied Physics Letters*. — 2010. — dec. — Vol. 97, no. 23. — P. 231120. — URL: <https://doi.org/10.1063/1.3526311>.
2. Valyukh S., Valyukh I., Chigrinov V. Liquid-Crystal Based Light Steering Optical Elements // *Photonics Letters of Poland*. — 2011. — jun. — Vol. 3, no. 2. — URL: <https://doi.org/10.4302/plp.2011.2.15>.
3. On liquid crystal diffractive optical elements utilizing inhomogeneous alignment / S. Valyukh [et al.] // *Optics Express*. — 2012. — jun. — Vol. 20, no. 14. — P. 15209. — URL: <https://doi.org/10.1364/oe.20.015209>.
4. Design rules for customizable optical materials based on nanocomposites / D. Werdehausen [et al.] // *Optical Materials Express*. — 2018. — oct. — Vol. 8, no. 11. — P. 3456. — URL: <https://doi.org/10.1364/ome.8.003456>.
5. Tailored nanocomposites for 3D printed micro-optics / K. Weber [et al.] // *Optical Materials Express*. — 2020. — sep. — Vol. 10, no. 10. — P. 2345. — URL: <https://doi.org/10.1364/ome.399392>.
6. Abirami N., Wilson K. S. Joseph. Magneto optical properties of silver doped magnetic nanocomposite material // *Sensing and Bio-Sensing Research*. — 2017. — nov. — Vol. 16. — P. 37–40. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.sbsr.2017.10.001>.
7. Shintaku T., Uno T. Preparation of Ce-Substituted Yttrium Iron Garnet Films for Magneto-Optic Waveguide Devices // *Japanese Journal of Applied Physics*. — 1996. — sep. — Vol. 35, no. Part 1, No. 9A. — P. 4689–4691. — URL: <https://doi.org/10.1143/jjap.35.4689>.
8. Beecroft L. L., Ober Ch. K. Nanocomposite Materials for Optical Applications // *Chemistry of Materials*. — 1997. — jun. — Vol. 9, no. 6. — P. 1302–1317. — URL: <https://doi.org/10.1021/cm960441a>.
9. Behrens S., Appel I. Magnetic nanocomposites // *Current Opinion in Biotechnology*. — 2016. — jun. — Vol. 39. — P. 89–96. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2016.02.005>.
10. Burke N. A. D., Stöver H. D. H., Dawson F. P. Magnetic Nanocomposites: Preparation and Characterization of Polymer-Coated Iron Nanoparticles // *Chemistry of Materials*. — 2002. — oct. — Vol. 14, no. 11. — P. 4752–4761. — URL: <https://doi.org/10.1021/cm020126q>.
11. Yaremchuk I. Ya. Optical properties of nanocomposite materials based on plasmon nanoparticles // *Semiconductor Physics Quantum Electronics and Optoelectronics*. — 2018. — jun. — Vol. 21, no. 2. — P. 195–199. — URL: <https://doi.org/10.15407/spqeo21.02.195>.
12. Nonlinear optical properties of nanocomposite materials / R. W. Boyd [et al.] // *Pure and Applied Optics: Journal of the European Optical Society Part A*. — 1996. — sep. — Vol. 5, no. 5. — P. 505–512. — URL: <https://doi.org/10.1088/0963-9659/5/5/005>.

**Сведения об авторах:**

**Елена Олеговна Сорокина** — студент факультета физико-математического и технологического образования ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», Ульяновск, Россия.

E-mail: elena2000sor@mail.ru, elena2000sor@gmail.com

ORCID iD  0000-0003-3661-9000

Web of Science ResearcherID  AAA-2139-2021

# Development of a system for testing knowledge in a distance course on the optics of nanocomposite materials in the learning management system MOODLE

E. O. Sorokina 

*Ulyanovsk State Pedagogical University, 432071, Ulyanovsk, Russia*

Submitted February 3, 2021

Resubmitted March 16, 2021

Published June 12, 2021

---

**Abstract.** The result of the development of a distance course on optics of nanocomposite materials, devoted to the study of the physical foundations of classical, nonlinear and quantum optics of nanocomposite materials, is considered. The distance course on optics of nanocomposite materials was created in the learning management system MOODLE on the educational portal of the Pedagogical University. The results of the development of the modular structure of the course, theoretical elements and elements of knowledge control in the optics of nanocomposite materials are described.

**Keywords:** optics, nanocomposite material, distance course, learning management system

PACS: 01.40.-d

---

## References

1. Liquid crystal light deflecting devices based on nonuniform anchoring / S. Valyukh [et al.] // *Applied Physics Letters*. — 2010. — dec. — Vol. 97, no. 23. — P. 231120. — URL: <https://doi.org/10.1063/1.3526311>.
2. Valyukh S., Valyukh I., Chigrinov V. Liquid-Crystal Based Light Steering Optical Elements // *Photonics Letters of Poland*. — 2011. — jun. — Vol. 3, no. 2. — URL: <https://doi.org/10.4302/plp.2011.2.15>.
3. On liquid crystal diffractive optical elements utilizing inhomogeneous alignment / S. Valyukh [et al.] // *Optics Express*. — 2012. — jun. — Vol. 20, no. 14. — P. 15209. — URL: <https://doi.org/10.1364/oe.20.015209>.
4. Design rules for customizable optical materials based on nanocomposites / D. Werdehausen [et al.] // *Optical Materials Express*. — 2018. — oct. — Vol. 8, no. 11. — P. 3456. — URL: <https://doi.org/10.1364/ome.8.003456>.
5. Tailored nanocomposites for 3D printed micro-optics / K. Weber [et al.] // *Optical Materials Express*. — 2020. — sep. — Vol. 10, no. 10. — P. 2345. — URL: <https://doi.org/10.1364/ome.399392>.
6. Abirami N., Wilson K. S. Joseph. Magneto optical properties of silver doped magnetic nanocomposite material // *Sensing and Bio-Sensing Research*. — 2017. — nov. — Vol. 16. — P. 37–40. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.sbsr.2017.10.001>.

7. Shintaku T., Uno T. Preparation of Ce-Substituted Yttrium Iron Garnet Films for Magneto-Optic Waveguide Devices // Japanese Journal of Applied Physics. — 1996. — sep. — Vol. 35, no. Part 1, No. 9A. — P. 4689–4691. — URL: <https://doi.org/10.1143/jjap.35.4689>.
8. Beecroft L. L., Ober Ch. K. Nanocomposite Materials for Optical Applications // Chemistry of Materials. — 1997. — jun. — Vol. 9, no. 6. — P. 1302–1317. — URL: <https://doi.org/10.1021/cm960441a>.
9. Behrens S., Appel I. Magnetic nanocomposites // Current Opinion in Biotechnology. — 2016. — jun. — Vol. 39. — P. 89–96. — URL: <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2016.02.005>.
10. Burke N. A. D., Stöver H. D. H., Dawson F. P. Magnetic Nanocomposites: Preparation and Characterization of Polymer-Coated Iron Nanoparticles // Chemistry of Materials. — 2002. — oct. — Vol. 14, no. 11. — P. 4752–4761. — URL: <https://doi.org/10.1021/cm020126q>.
11. Yaremchuk I. Ya. Optical properties of nanocomposite materials based on plasmon nanoparticles // Semiconductor Physics Quantum Electronics and Optoelectronics. — 2018. — jun. — Vol. 21, no. 2. — P. 195–199. — URL: <https://doi.org/10.15407/spqeo21.02.195>.
12. Nonlinear optical properties of nanocomposite materials / R. W. Boyd [et al.] // Pure and Applied Optics: Journal of the European Optical Society Part A. — 1996. — sep. — Vol. 5, no. 5. — P. 505–512. — URL: <https://doi.org/10.1088/0963-9659/5/5/005>.

**Information about authors:**

**Elena Olegovna Sorokina** — student of the Faculty of Physics, Mathematics and Technological Education of the Ulyanovsk State Pedagogical University, Ulyanovsk, Russia.

E-mail: [elena2000sor@mail.ru](mailto:elena2000sor@mail.ru), [elena2000sor@gmail.com](mailto:elena2000sor@gmail.com)

ORCID iD  0000-0003-3661-9000

Web of Science ResearcherID  AAA-2139-2021

УДК 539.182  
ББК 22.314  
ГРНТИ 29.31.17  
ВАК 01.04.15

## Разработка элементов дистанционного курса по физическим основам квантовой криптографии

Я. С. Замлелова  <sup>1</sup>

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», 432071, Ульяновск, Россия

Поступила в редакцию 18 марта 2021 года  
После переработки 14 апреля 2021 года  
Опубликована 12 июня 2021 года

---

**Аннотация.** Произведено описание разработки элементов онлайн-курса по физическим основам квантовой криптографии при помощи инструментария MOODLE. Онлайн-курс по элементарной физике, созданный при помощи инструментария MOODLE, можно использовать для информационного обеспечения смешанного обучения студентов при изучении физических основ квантовой криптографии, а также для визуализации процесса обучения физическим основам квантовой криптографии. Использование элементов контроля курса по физическим основам квантовой криптографии позволит систематизировать контроль теоретических знаний по физическим основам квантовой криптографии.

**Ключевые слова:** курс, квантовая криптография, физические основы квантовой криптографии, педагогическое образование, информатизация образования, образовательный процесс университета, методика дистанционного обучения

PACS: 03.67.Dd

---

## Введение

Современное общество характеризуется высокой степенью распространения информационных технологий. Однако с быстрым развитием телекоммуникационных технологий очень остро встаёт вопрос о сохранности с их помощью передаваемых данных. Способам передачи информации по различным каналам связи и методам защиты информации отводится всё более важная роль как в научных исследованиях, так и в повседневной практической деятельности. В конечном итоге сформировалась такая отрасль, как информационная безопасность, и наиболее широкое распространение получает такая наука, как криптография.

Актуальность изучения данной проблемы обусловлена тем, что использование электронных курсов решает проблему систематизации теоретического материала, задач и

---

<sup>1</sup>E-mail: zamlelowa1998@mail.ru

заданий, а также обеспечивает планомерную выдачу заданий, последовательный контроль и даёт рациональный подход в преподавании курса по физическим основам квантовой криптографии.

Целью исследования является разработка дистанционного курса по физическим основам квантовой криптографии.

В задачи исследования входит анализ научной литературы по квантовой криптографии и разработка дистанционного курса по физическим основам квантовой криптографии.

Объектом исследования является дистанционный курс по физическим основам квантовой криптографии.

Предметом исследования является процесс создания дистанционного курса по физическим основам квантовой криптографии в системе управления обучением MOODLE.

Гипотеза исследования состоит в выяснении того, каковы особенности проектирования дистанционного образовательного ресурса по физическим основам квантовой криптографии.

Создание дистанционного курса по физическим основам квантовой криптографии позволит повысить эффективность самостоятельной работы обучающихся при изучении квантовой криптографии.

В качестве методов исследования используются компьютерные методы создания курсов на платформе MOODLE.

Научная новизна работы заключается в сочетании традиционных и дистанционных технологий при изучении физических основ квантовой криптографии в педагогическом университете.

Материалами исследования являются теоретические материалы курса по физическим основам квантовой криптографии.

## **Обзор работ по квантовой криптографии и квантовым криптосистемам**

Квантовая криптография, или, точнее, распространение квантового ключа, за которым следует одноразовый блокнот, является единственным безопасным способом передачи секретной информации (см. [1] для обзора). Его безопасность основана не на некоторых математических предположениях, таких как вычислительная мощность ограниченного прослушателя, а на законах квантовой механики. Из-за принципа неопределённости Гейзенберга измерение в квантовой системе изменяет саму систему. Таким образом, измерение Евы в квантовом состоянии, несущем информацию отправителя, приводит к изменению состояния, которое может заметить Алиса и Боб. Безопасность схем распределения квантовых ключей также может быть понята в терминах теоремы отсутствия клонирования [2]. Ева не может сделать и сохранить идеальную копию квантового состояния, несущего информацию от Алисы Бобу. Хорошо известно, что существование совершенной квантовой копирующей машины позволило бы победить принцип неопределённости Гейзенберга.

Квантовая криптография ещё не вышла на уровень практического использования, но приблизилась к нему. В мире существует несколько организаций, где ведутся активные исследования в области квантовой криптографии. Среди них IBM, GAP-Optique, Mitsubishi, Toshiba, Национальная лаборатория в Лос-Аламосе, Калифорнийский технологический институт (Caltech), а также молодая компания MagiQ и холдинг QinetiQ, поддерживаемый британским министерством обороны. Диапазон участников охватывает как крупнейшие мировые институты, так и небольшие начинающие компании, что позволяет говорить о начальном периоде в формировании рыночного сегмента, когда в нём на равных могут участвовать и те, и другие.

В настоящее время средства и методы криптографии используются для обеспечения информационной безопасности не только государства, но и частных лиц, организаций. В современный век информационных технологий большой обмен информацией происходит в цифровом виде через открытые каналы связи. Информация может быть повергнута различного рода угрозам: недружественному ознакомлению, подмене, фальсификации, накоплению и т.д. Именно криптография даёт наиболее надёжные методы защиты от таких угроз.

Современные квантовые системы связи основаны на использовании квантовых свойств носителей информации [3]. Если в обычных телекоммуникационных сетях данные кодируются в амплитуде и частоте излучения или электрических колебаний, то в квантовых — в амплитуде электромагнитного поля или в поляризации фотонов [4]. Разумеется, потребуются значительно более дорогая и сложная аппаратура, но эти ухищрения оправданны: дело в том, что передача информации по квантовым каналам обеспечивает стопроцентную защиту от прослушивания. Согласно законам квантовой механики измерение свойств того или иного квантового объекта, например измерение поляризации фотона, неминуемо меняет его состояние. Получатель увидит, что состояние фотонов изменилось, и предотвратить это нельзя в принципе — таковы фундаментальные законы природы.

Конечно же, квантовое направление криптографической защиты информации очень перспективно [5], так как квантовые законы позволяют вывести методы защиты информации на качественно новый уровень. На сегодняшний день уже существует опыт по созданию и апробированию компьютерной сети, защищенной квантово-криптографическими методами — единственной в мире сети, которую невозможно взломать.

В работе [6] рассмотрены две квантовые криптографические схемы, основанные на кодировании ключа в кубитах, то есть в квантовых состояниях в  $d$ -мерном гильбертовом пространстве. Первая криптосистема использует две взаимно несмещенные базы (тем самым расширяя схему BB84), в то время как вторая использует все доступные  $d + 1$  взаимно несмещенные базы (расширяя протокол шести состояний для кубитов). Затем извлекаем информацию, полученную потенциальным перехватчиком, применяя клонированную индивидуальную атаку, а также верхнюю границу частоты ошибок, которая обеспечивает безусловную защиту от когерентных атак.

В работе [7] проанализировано расстояние распространения секретного ключа в случае строго однофотонного источника для протоколов BB84 и фазового кодирования (протокол PTC).

В работе [8] проанализированы потери, существующие в канале связи, и возможные атаки с однозначными измерениями, приводящие к потере безопасности с учётом того, что источник квантовых состояний не является строго однофотонным. Проблема стабильности протоколов квантового распределения ключей в канале с большими потерями ещё не решена.

В работе [9] предложена новая релятивистская квантовая криптосистема, в которой информация передаётся расширенными однофотонными состояниями с ортогональной поляризацией и эффективной длиной, превышающей длину канала связи. Эффект лёгкого «ареста» используется в качестве процедуры для обнаружения и подготовки расширенных состояний. Криптосистема защищена от попыток подслушивания, поскольку её состояния квантуются, а скорость распространения ограничена. В этой схеме процедуры подготовки и обнаружения являются локальными в пространстве, но требуют конечного времени, в зависимости от расширения состояний. Подготовка к обнаружению в конце приёмника начинается до того, как состояние покинет источник на входе.

В работе [10] показано, что релятивистская квантовая криптография включает в себя не только геометрические свойства векторов состояния квантовой системы в гиль-

бертовом пространстве, но и свойства носителей квантовых состояний в пространстве–времени Минковского. Физический тип квантового объекта, несущего квантовую информацию с чрезвычайно высокой скоростью в пространстве–времени, имеет фундаментальное значение в современной теории квантовой информации.

Структура четырёхмерного пространства–времени Минковского или неприводимые представления группы Пуанкаре в гильбертовом пространстве, ответственна за существование безмассовых частиц, фотонов. В этом смысле структура пространства–времени на самом деле используется в релятивистских системах квантовой криптографии для распределения криптографических ключей. Это позволяет гарантировать безопасность ключей даже при использовании ортогональных состояний.

Рассмотрим работы по безопасности криптографических ключей в системах квантовой криптографии. В работе [11] рассматривается безопасность криптографических ключей в системах квантовой криптографии, которая гарантируется фундаментальными квантово-механическими принципами. Квантовый канал, через который передаются квантовые состояния, не контролируется, и подслушивающее устройство может выполнять с ним любые модификации.

В работе [12] рассматривается безопасность ключей в квантовой криптографии, основанная на фундаментальных квантово-механических исключениях (исключение клонирования и копирования неортогональных квантовых состояний). Физический тип квантового объекта, несущего информацию (фотон, электрон, атом и т. д.) незначителен, важен только его вектор состояния. В релятивистской квантовой криптографии для открытого пространства фундаментальное значение имеют как время информационного носителя (фотон, который распространяется с предельно допустимой скоростью в вакууме), так и его квантовое состояние. Основные фундаментальные ограничения, которые диктуются как специальной теорией относительности, так и квантовой механикой при распознавании неортогональных квантовых состояний позволяют сформулировать принципиально новые протоколы распределения ключей, которые устойчивы к любым атакам на ключ и гарантируют безопасность ключей для нестрого однофотонного источника и исключают любые потери. В связи с этим протокол является протоколом реального времени в пространстве–времени Минковского. Здесь атака на канал связи обнаруживается задержкой результатов измерения подслушивания, протокол не требует синхронизации часов на стороне передатчика и приёмника.

В работе [7] проанализировано расстояние распространения секретного ключа в случае строго однофотонного источника для протоколов BB84 и фазового кодирования (протокол PTC). В работе [8] проанализированы потери, существующие в канале связи, и возможные атаки с однозначными измерениями, приводящие к потере безопасности с учётом того, что источник квантовых состояний не является строго однофотонным. Проблема стабильности протоколов квантового распределения ключей в канале с большими потерями ещё не решена.

В работе [13] предложен новый протокол для квантовой криптографии. Протокол основан на использовании набора измерений, которые позволяют полностью восстановить матрицу плотности, являющуюся носителем информации о физической системе. Такой протокол может быть реализован посредством гомодинного детектирования (хорошо известного в квантовой оптике) электромагнитного поля. В работе [13] приводится пример квантовой криптосистемы, в которой вакуумное состояние фотонного поля используется как одно из двух информационных состояний. Это новейшая методика, которая может быть использована для обеспечения конфиденциальности информации, передаваемой между двумя сторонами, обычно называемой Алисой и Бобом, путём использования противоинтуитивного поведения элементарных частиц, таких как фотоны.

В работе [9] предложена новая релятивистская квантовая криптосистема, в которой

информация передаётся расширенными однофотонными состояниями с ортогональной поляризацией и эффективной длиной, превышающей длину канала связи. Эффект лёгкого «ареста» используется в качестве процедуры для обнаружения и подготовки расширенных состояний. Криптосистема защищена от попыток подслушивания, поскольку её состояния квантуются, а скорость распространения ограничена. В этой схеме процедуры подготовки и обнаружения являются локальными в пространстве, но требуют конечного времени, в зависимости от расширения состояний. Подготовка к обнаружению в конце приёмника начинается до того, как состояние покинет источник на входе.

В работе [10] показано, что релятивистская квантовая криптография включает в себя не только геометрические свойства векторов состояния квантовой системы в гильбертовом пространстве, но и свойства носителей квантовых состояний в пространстве-времени Минковского. Физический тип квантового объекта, несущего квантовую информацию с чрезвычайно высокой скоростью в пространстве-времени, имеет фундаментальное значение.

Структура пространства-времени Минковского или неприводимые представления группы Пуанкаре в гильбертовом пространстве, ответственна за существование безмассовых частиц, фотонов. В этом смысле структура пространства-времени на самом деле используется в релятивистских системах квантовой криптографии для распределения криптографических ключей. Это позволяет гарантировать безопасность ключей даже при использовании ортогональных состояний.

В работе [12] рассматривается безопасность ключей в квантовой криптографии, основанная на фундаментальных квантово-механических исключениях (исключение клонирования и копирования неортогональных квантовых состояний). Физический тип квантового объекта, несущего информацию (фотон, электрон, атом и т. д.) незначителен, важен только его вектор состояния. В релятивистской квантовой криптографии для открытого пространства фундаментальное значение имеют как время информационного носителя (фотон, который распространяется с предельно допустимой скоростью в вакууме), так и его квантовое состояние. Основные фундаментальные ограничения, которые диктуются как специальной теорией относительности, так и квантовой механикой при распознавании неортогональных квантовых состояний позволяют сформулировать принципиально новые протоколы распределения ключей, которые устойчивы к любым атакам на ключ и гарантируют безопасность ключей для нестрого однофотонного источника и исключают любые потери. В связи с этим протокол является протоколом реального времени в пространстве-времени Минковского. Здесь атака на канал связи обнаруживается задержкой результатов измерения подслушивания, протокол не требует синхронизации часов на стороне передатчика и приёмника.

В работе [11] рассматривается безопасность криптографических ключей в системах квантовой криптографии, которая гарантируется фундаментальными квантово-механическими принципами. Квантовый канал, через который передаются квантовые состояния, не контролируется, и подслушивающее устройство может выполнять с ним любые модификации.

В работе [13] предложен новый протокол для квантовой криптографии. Протокол основан на использовании набора измерений, которые позволяют полностью восстановить матрицу плотности, являющуюся носителем информации о физической системе. Такой протокол может быть реализован посредством гомодинного детектирования (хорошо известного в квантовой оптике) электромагнитного поля. В работе [13] приводится пример квантовой криптосистемы, в которой вакуумное состояние фотонного поля используется как одно из двух информационных состояний.

Ограничение на длину линии связи связано с так называемой атакой с расщеплением числа фотонов [14]. Применительно к одному из основных протоколов распределения

ключей BB84 [15] атака с расщеплением числа фотонов сводится к следующему [16]. Подслушиватель (Ева) определяет неразрушающим образом число фотонов в каждой посылке, но не их состояние. На такие измерения не существует принципиальных запретов в квантовой механике. Если обнаружен один фотон, то посылка блокируется. Если обнаружено два и более фотонов, то один из фотонов Ева направляет через свой канал с меньшим затуханием (в идеале без затухания) на приёмную сторону к Бобу, а остальные сохраняет в квантовой памяти и ждет стадии раскрытия базисов. При длине линии выше критической, соответственно потерях в линии, Ева может блокировать все однофотонные посылки, производит ошибки на приёмной стороне, и остаться незамеченной. После раскрытия базисов Ева измеряет состояния в своей квантовой памяти уже в известном базисе. Поскольку в каждом базисе в протоколе BB84 состояния ортогональны, то при известном базисе Ева достоверно узнает каждый передаваемый бит и не производит ошибок на приёмной стороне. Таким образом, для достоверного знания каждого бита ключа Еве достаточно двухфотонной компоненты. Критическая длина линии связи, до которой можно передавать ключи, фактически определяется из того условия, что вероятность потери фотона в линии равна вероятности (доле) однофотонной компоненты в передаваемых квантовых состояниях.

Атака с расщеплением числа фотонов — атака не меняет общего числа посылок, достигающих приёмной стороны, но меняет распределение вероятностей по числам заполнения фотонов. Существующие на сегодняшний день лавинные фотодетекторы не различают числа фотонов, поэтому для обнаружения изменения распределения по числу фотонов требуется существенная модификация как протокола передачи ключей, так и самой системы.

Второй путь нейтрализации атаки с расщеплением числа фотонов — атака состоит в использовании протоколов, стойких относительно такой атаки. Слабость протокола BB84 относительно атаки с расщеплением числа фотонов, как видно из рассуждений, приведенных выше, состоит в том, что состояния внутри каждого базиса ортогональны. Поэтому естественный способ видоизменения протокола состоит в том, чтобы сделать состояния внутри базисов неортогональными, соответственно, достоверно неразличимыми. Оказывается, что в этом случае для достоверного знания каждого бита Еве достаточно трёхфотонной компоненты. Поэтому протокол секретен до тех пор, пока длина канала связи и потери в нем не превышают такой величины, что Ева может блокировать все одно- и двухфотонные посылки. В полном объёме стойкость подобного протокола не проанализирована [7, 17, 18].

Протокол распределения ключей с фазово-временным кодированием для однофотонного источника не требует сколько-нибудь заметной модификации самой системы и имеет наибольшую критическую ошибку, до которой можно передавать ключи в однофотонном режиме. Был сделан анализ стойкости данного протокола для случая, когда квантовые состояния не являются строго однофотонными, а представляют собой ослабленное лазерное излучение. Оказывается, что для получения достоверной информации о каждом бите ключа Еве необходима, как минимум, пятифотонная компонента. Поэтому длина линии связи и потери должны быть таковы, чтобы Ева могла блокировать все одно-, двух-, трёх-, четырёх- и почти все пятифотонные посылки, чтобы знать каждый бит ключа достоверно. Однако при учёте темновых отсчётов фотодетекторов на приёмной стороне оказывается, что Ева не имеет возможности для атаки с расщеплением числа фотонов, поскольку для данного протокола длина линии связи, начиная с которой атака с расщеплением числа фотонов становится эффективной, больше, чем длина, на которой определяющую роль начинают играть темновые отсчёты, которые фактически и лимитируют длину линии связи.

## Результаты разработки дистанционного курса по физическим основам квантовой криптографии

Рассмотрим описание функциональных возможностей курса по физическим основам квантовой криптографии в системе управления обучением MOODLE. Непрерывное совершенствование системы высшего педагогического образования в условиях информационного общества выдвигает на передний план теории и практики новые проблемы, связанные с необходимостью переноса части образовательного процесса в информационно-образовательное пространство Интернета. Рассмотрим процесс создания дистанционного курса по физическим основам квантовой криптографии в системе управления обучением MOODLE. Курс посвящён изучению фундаментальных идей квантовой криптографии, криптографических концепций и инструментов таких, как определения безопасности, минимальная энтропия, усиление конфиденциальности, а также протоколов и доказательств безопасности для распределения квантовых ключей, основ независимой от устройства квантовой криптографии, современных квантовых криптографических задач и протоколов. Курс знакомит нас с основными понятиями, такими как квантовая криптография, квантовое шифрование и дешифрование, шифр, ключ, открытый текст, вскрытие шрифта, с классификацией криптографических алгоритмов, с основоположником современной криптографии — Клодом Шенноном, его жизнью и незаменимым вкладом в развитие данной науки (дал определение абсолютно стойкого шрифта и указал возможные методы взлома криптоалгоритма). Представим тематическое планирование элективного курса по квантовой криптографии в виде списка:

1. Квантовые технологии — обзор. Введение в квантовую теорию информации, теорема о запрете на квантовое клонирование
2. Квантовая криптография по протоколу BB84. Протокол BB84 и атаки на него
3. Некоторые другие протоколы: с шестью состояниями, B92, SARG
4. Исправление ошибок ключа
5. Энтропийные соотношения неопределённостей, доказательства стойкости и усиление секретности
6. Протокол с обманными состояниями
7. Запутанные состояния, неравенства Белла и протокол E91
8. Протоколы с непрерывными наблюдаемыми
9. Аппаратное обеспечение для квантовой криптографии
10. Проблема декогеренции. Декогеренция и её причины. Масштабы времени декогеренции
11. Методы преодоления декогеренции. Квантовая коррекция ошибок

На рис. 1 приведено изображение элементов первой темы дистанционного курса по физическим основам квантовой криптографии, созданного в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 2 приведено изображение элементов второй темы дистанционного курса по физическим основам квантовой криптографии, созданного в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 3 приведено изображение первой части структуры дистанционного курса по физическим основам квантовой криптографии, созданного в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 4 приведено изображение второй части структуры дистанционного курса по физическим основам квантовой криптографии, созданного в системе управления обучением MOODLE.

Среди элективных курсов особое место может занять разработанный дистанционный курс по физическим основам квантовой криптографии. Основные задачи изучения

**1. Квантовые технологии – обзор. Введение в квантовую теорию информации, теорема о запрете на квантовое клонирование**

- Квантовая криптография. Лекция 1
- Квантовая криптография. Видеолекция 1
- Китаев А., Шень А., Вялый М. Классические и квантовые вычисления. - М.: МЦНМО, ЧеРо, 1999. - 192 с.
- Альбов, А. С. Квантовая криптография / А. С. Альбов ; авт. ид. и ред. сер. С. Л. Деменок ; худож. М. Ляпунов. - Санкт-Петербург : Страта, 2015. - 248 с.
- Попов, Д. Е. Введение в физику квантовой информации : учебное пособие / Д. Е. Попов. - Кострома : КГУ им. Н. А. Некрасова, 2012. - 216 с.
- Де-Касто, В. Просто криптография / В. Де-Касто ; авт. ид. и ред. сер. С. Л. Деменок ; пер. с англ. М. Жуковой ; ил. Т. В. Ковалёва. - Санкт-Петербург : Страта, 2014. - 208 с.
- Юсупов, С. С. Структура, функции и оценка программного обеспечения ККС / С. С. Юсупов. - Москва : Лаборатория книги, 2012. - 75 с.
- Хренников, А. Ю. Введение в квантовую теорию информации / А. Ю. Хренников. - Москва : Физматлит, 2008. - 141 с.
- Кнауб, Л. В. Теоретико-численные методы в криптографии : учебное пособие / Л. В. Кнауб, Е. А. Новиков, Ю. А. Шитов. - Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2011. - 160 с.
- Василенко, О. Н. Теоретико-числовые алгоритмы в криптографии (2-е издание, дополненное) / О. Н. Василенко. - 2-е изд., доп. - Москва : МЦНМО, 2006. - 336 с.
- Фороузан, Б. А. Математика криптографии и теория шифрования / Б. А. Фороузан. - 2-е изд., испр. - Москва : Национальный Открытый Университет «ИНТУИТ», 2016. - 511 с.
- Басалова, Г. В. Основы криптографии : курс лекций / Г. В. Басалова ; Национальный Открытый Университет "ИНТУИТ". - Москва : Интернет-Университет Информационных Технологий, 2011. - 253 с.
- Гульятеева, Т. А. Основы теории информации и криптографии : конспект лекций / Т. А. Гульятеева. - Новосибирск : НГТУ, 2010. - 88 с.

Рис. 1. Элементы первой темы дистанционного курса по физическим основам квантовой криптографии в системе дистанционного обучения на платформе MOODLE.

дистанционного курса по физическим основам квантовой криптографии состоят в развитии у студента логики мышления, интуиции и творческих способностей; овладении системой знаний и умений по криптографии для последующего обучения её в ВУЗах; применение компьютера для эффективного шифрования информации; изучение математического пакета Maple для последующего его применения в шифровании данных.

Правильная подборка задач поможет закрепить изученный материал и подготовить студента к решению задач по квантовой криптографии.

### Теоретические материалы курса по физическим основам квантовой криптографии

При  $L_1 < L < L_5$  ( $L_1, L_5$  — длины, начиная с которых Ева может блокировать все послышки вплоть до пятифотонных) критическая длина линии связи в этом диапазоне определяется лишь темновыми отсчётами на приёмной стороне и энтропией фон Неймана источника квантовых состояний на передающей стороне.

Настройка

Навигация

Предстоящие события

Последние действия

Последние объявления

Поиск по форумам

## 2. Квантовая криптография по протоколу BB84.

### Протокол BB84 и атаки на него

III

Квантовые вычисления <small>Где квантовые вычисления превосходят классические</small>	Введение <small>Свойства квантовых систем</small>
Квантовые состояния	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Рассмотрим физическую систему, у которой может быть <math>n</math> состояний.</li> <li>• Назовём их <math> 1\rangle,  2\rangle, \dots,  n\rangle</math>.</li> <li>• Квантовое состояние <math> \phi\rangle</math> – суперпозиция классических:</li> </ul> $ \phi\rangle = \alpha_1  1\rangle + \alpha_2  2\rangle + \dots + \alpha_n  n\rangle.$ <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>\alpha_i \in \mathbb{C}</math> – амплитуда <math> i\rangle</math> в <math> \phi\rangle</math>, <math>\sum_i  \alpha_i ^2 = 1</math>.</li> </ul>	
Идея и структура	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Цель: установить общий ключ. Публично выбирается модуль <math>n</math> и число <math>g</math>, взаимно простое с <math>n</math>.</li> <li>• Алиса выбирает <math>a</math>, Боб выбирает <math>b</math>. Алиса посылает <math>g^a</math>, Боб посылает <math>g^b</math>. В результате каждый может вычислить <math>g^{ab}</math>.</li> </ul>	

Рис. 2. Элементы второй темы дистанционного курса по физическим основам квантовой криптографии в системе дистанционного обучения на платформе MOODLE.

Однофотонные информационные состояния в квантовом протоколе связи с фазово-временным кодированием в базисах  $+$ ,  $L$ ,  $\times$ ,  $L$  имеют вид [14]:

$$|0, +L\rangle = \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) |1\rangle + \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) |2\rangle, \tag{1}$$

$$|1, +L\rangle = \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) |1\rangle - \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) |2\rangle. \tag{2}$$

$$|0, \times L\rangle = -\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) |1\rangle + \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) |2\rangle, \tag{3}$$

$$|1, \times L\rangle = \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) |1\rangle + \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) |2\rangle, \tag{4}$$

соответственно, в базисах  $+$ ,  $R$  и  $\times$ ,  $R$ , имеем

$$|0, +R\rangle = \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) |2\rangle + \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) |3\rangle, \tag{5}$$

$$|1, +R\rangle = \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) |2\rangle - \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) |3\rangle. \tag{6}$$

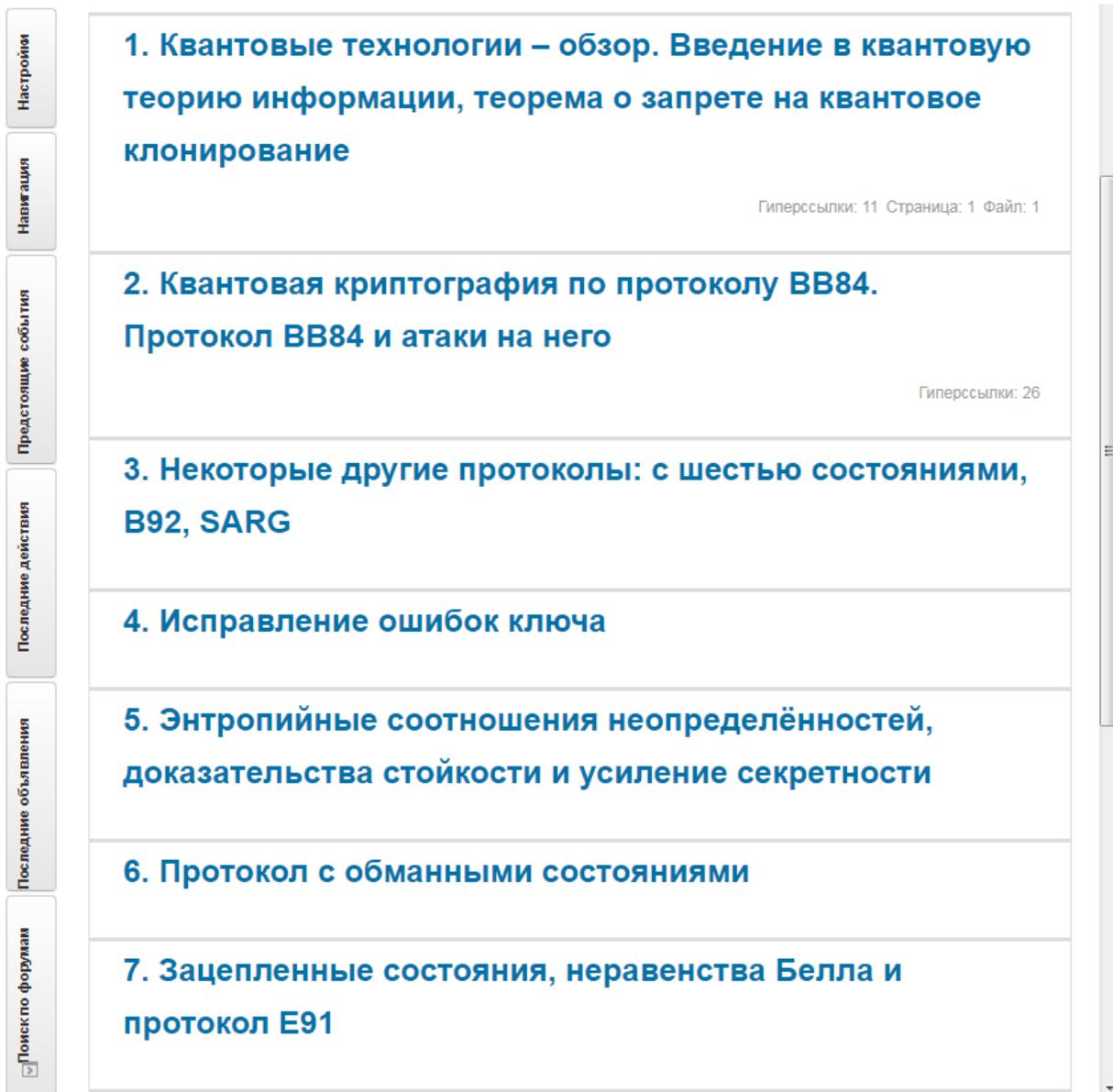


Рис. 3. Первая часть структуры дистанционного курса по физическим основам квантовой криптографии в системе дистанционного обучения на платформе MOODLE.

$$|0, \times R\rangle = -\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) |2\rangle + \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) |3\rangle, \quad (7)$$

$$|1, \times R\rangle = \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) |2\rangle + \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) |3\rangle. \quad (8)$$

Здесь  $|l\rangle_{-l} = 1, 2, 3$  — локализованные состояния во временных слотах 1, 2, 3, которые сдвинуты по времени на одинаковую величину.

Выберем состояния внутри базисов  $L$  и  $R$  неортогональными  $\langle 0 + L | 1 + L \rangle = \langle 0 \times L | 1 \times L \rangle = \cos(\alpha)$ , как в протоколе B92, а между базисами  $+L$  и  $\times L$  ( $+R$  и  $\times R$ ) частично ортогональны  $\langle 0 + L | 0 \times L \rangle = \langle 1 + L | 1 \times L \rangle = 0$  ( $\langle 0 + R | 0 \times R \rangle = \langle 1 + R | 1 \times R \rangle = 0$ ). Аналогично и в базисе  $R$ . Информационные неоднофотонные состояния получаются ослаблением когерентного состояния. Поскольку от посылки к посылке относительная фаза в состояниях не фиксирована, то подслушиватель видит в канале связи усреднённую

Настройки	<b>4. Исправление ошибок ключа</b>
Навигация	<b>5. Энтропийные соотношения неопределённостей, доказательства стойкости и усиление секретности</b>
Предстоящие события	<b>6. Протокол с обманными состояниями</b>
Последние действия	<b>7. Зацепленные состояния, неравенства Белла и протокол E91</b>
Последние объявления	<b>8. Протоколы с непрерывными наблюдаемыми</b>
Поиск по форумам	<b>9. Аппаратное обеспечение для квантовой криптографии</b>
	<b>10. Проблема декогеренции. Декогеренция и её причины. Масштабы времени декогеренции</b>
	<b>11. Методы преодоления декогеренции. Квантовая коррекция ошибок</b>
	<b>Итоговый контроль</b>

Рис. 4. Вторая часть структуры дистанционного курса по физическим основам квантовой криптографии в системе дистанционного обучения на платформе MOODLE.

ное по фазе когерентное состояние

$$\rho_A(i, b) = \bigoplus_{k=0}^{\infty} p_k (|i, b\rangle^{\otimes k}) (\langle i, b|)^{\otimes k},$$

$$p_k = \frac{\mu^k}{k!},$$

$$i = 0, 1, \quad b = +L, \times L, +R, \times R,$$
(9)

где  $\mu$  – среднее число фотонов в когерентном состоянии. Рассмотрение ниже годится и для источника с произвольным распределением по числу фотонов, а не только когерентного состояния.

Проведём анализ измерений на приёмной стороне. Перейдём теперь к измерениям на приёмной стороне. Боб случайно и равновероятно выбирает измерения в одном из двух

базисов. Формально измерения описываются следующими разложениями единицы:

$$I = A_{0,b} + A_{1,b} + A_{x,b}, \quad A_{0,b} = \frac{I - |1, b\rangle\langle 1, b|}{1 + |\langle 0, b|1, b\rangle|}, \quad (10)$$

$$A_{1,b} = \frac{I - |0, b\rangle\langle 0, b|}{1 + |\langle 0, b|1, b\rangle|}, \quad A_{x,b} = I - A_{0,b} - A_{1,b}. \quad (11)$$

Измерения аналогичны измерениям в протоколе В92 Измерения (10) обладают тем свойством, что ненулевой результат в канале  $A_{0,b}$  возникает только от состояния  $|0, b\rangle$ , и никогда от состояния  $|1, b\rangle$ . Аналогично для исходов в канале  $A_{1,b}$ . Отсчёты в канале  $A_{1,b}$  отвечают результатам с неопределённым исходом, такие отсчёты отбрасываются. Вероятность отсчётов с определённым исходом есть

$$Pr\{|0, b\rangle\langle 0, b|A_{0,b}\} = Pr\{|1, b\rangle\langle 1, b|A_{1,b}\} = 1 - \cos(\eta). \quad (12)$$

После отбрасывания результатов с неопределённым исходом информация Боба в битах в пересчёте на одну оставленную позицию составляет  $I(A; B) = 1$  (при идеальных фотодетекторах). Учтём теперь неидеальность фотодетекторов.

С учётом потерь вероятность достижения информационными состояниями приёмной стороны есть

$$P_{detected} = (1 - e^{-\mu} - (e^{-\mu\Gamma} - e^{-\mu})(1 - \cos(\alpha))). \quad (13)$$

Данная величина равна доле непустых посылок. Все лавинные фотодетекторы в телекоммуникационном диапазоне длин волн 1.3 – 1.55 мкм работают в стробируемом режиме. Фотодетектор активируется посредством подачи короткого импульса напряжения длительности 1-2 нс в момент возможного прихода информационного состояния. Темновые отсчёты с определённой вероятностью имеют место в момент стробирования независимо от прихода состояния.

Рассмотрим квантовые эффективности фотодетекторов и вероятности фотоотсчётов. Пусть квантовые эффективности фотодетекторов равны  $\eta_0$  и  $\eta_1$  учётом (13) вероятность детектирования информационных состояний 0 и 1 в окне стробирования равна  $\eta_{0,1}(L) = \frac{1}{2}P_{detected}\eta_{0,1}$ . Темновые отсчёты возникают только в моменты стробирования, вероятность темнового отсчёта во временном окне строга есть  $p_{d0}^{(0)}$  и  $p_{dark}^{(1)}$ . Фотоотсчёты в детекторах  $\bar{D}_0$  и  $\bar{D}_1$  можно разбить на следующие множества (рис. 5).  $A_0$  и  $A_1$  – множества отсчётов от информационных состояний.  $D_0$  и  $D_1$  – множества темновых отсчетов соответственно в детекторе  $\bar{D}_0$  и  $\bar{D}_1$ . Напомним, что оба детектора стробируются одновременно, поэтому темновые отсчёты могут иметь место одновременно (в одном и том же строге) в двух фотодетекторах.

$A_1$  – множество одновременных отсчётов только от информационных состояний  $A_0$  и темновых отсчётов  $D_0$  (аналогично для множества  $A_7$ ).  $A_2$  – множество одновременных отсчётов только от информационных состояний  $A_0$  и темновых отсчётов в детекторе  $D_1$  (аналогично для  $A_5$ ).  $A_3$  – множество одновременных отсчётов от  $A_0$ ,  $D_0$  и  $D_1$ . Аналогично для множества отсчётов  $A_6$ .  $A_4$  – множество одновременных отсчётов только от  $D_0$  и  $D_1$ . Множества  $A_0$  и  $A_1$  не пересекаются, поскольку Алиса посылает либо 0, либо 1. Одновременные события в одном временном строге в одном детекторе от информационного состояния и темнового шума воспринимаются как один фотоотсчёт. Одновременные фотоотсчёты в двух детекторах в одном временном строге отбрасываются. Вероятность отсчёта от информационных состояний 0 и 1 равна

$$\begin{aligned} Pr\{info\} &= Pr\{A_0 + A_1 - A_0 \cap D_1 - A_1 \cap D_0\} = \\ &= \eta_0(L) + \eta_1(L) - \eta_0(L)p_{dark}^{(0)} - \eta_1(L)p_{dark}^{(1)}. \end{aligned} \quad (14)$$

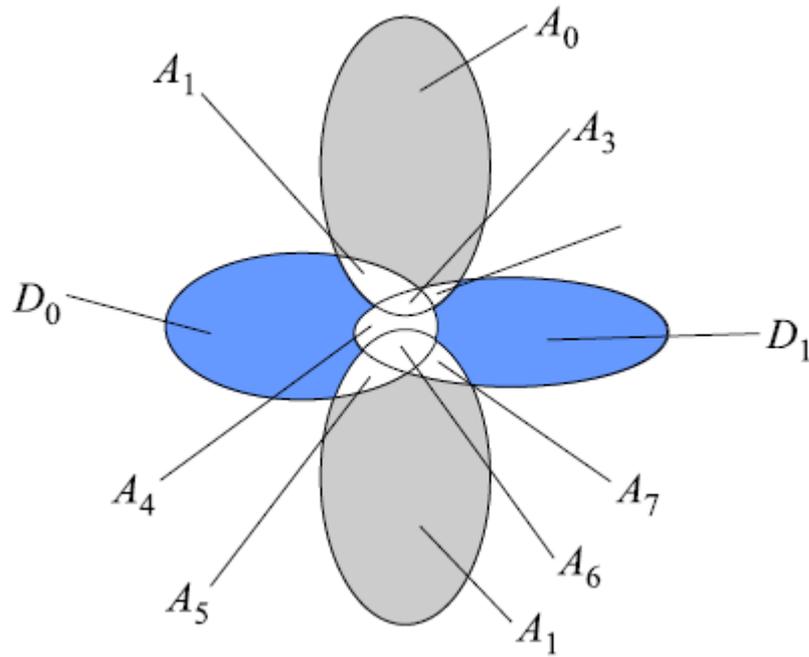


Рис. 5. Различные множества событий фотоотсчётов.

Вероятность исходов только от темновых отсчётов равна (напомним, что одновременные отсчёты в двух детекторах отбрасываются)

$$\begin{aligned}
 Pr\{dark\} &= \\
 &= Pr\{D_0 + D_1 - 2(D_0 \cap D_1 - \\
 &\quad - A_0 \cap D_0 \cap D_1 - A_1 \cap D_0 \cap D_1) - \\
 &\quad - (A_0 \cap D_0 - A_0 \cap D_0 \cap D_1) - (A_1 \cap D_0 - A_1 \cap D_0 \cap D_1) - \\
 &\quad - (A_1 \cap D_1 - A_1 \cap D_0 \cap D_1) - (A_0 \cap D_1 - A_0 \cap D_0 \cap D_1)\} = \\
 &= p_{dark}^{(0)} + p_{dark}^{(1)} - (\eta_0(L) + \eta_1(L))(p_{dark}^{(0)} + p_{dark}^{(1)}) + \\
 &\quad + 4(\eta_0(L) + \eta_1(L))p_{dark}^{(0)}p_{dark}^{(1)} - 2p_{dark}^{(0)}p_{dark}^{(1)}.
 \end{aligned} \tag{15}$$

Поскольку состояния, отвечающие 0 и 1, посылаются равновероятно, то только половина из каждого непересекающегося множества темновых отсчётов будет давать правильные отсчёты. Другая половина отсчётов будет ошибочной. Для вероятности ошибки на приёмной стороне у Боба имеем

$$Q(L) = \frac{\frac{1}{2}Pr\{dark\}}{Pr\{info\} + Pr\{dark\}}. \tag{16}$$

Ошибка принимает особенно простое выражение при  $\eta_0(L) = \eta_1(L) = \eta(L)$ ,  $p_{dark}^{(0)} = p_{dark}^{(1)} = p_{dark}$ . С точностью до линейных членов по  $\eta(L)$ ,  $p_{dark}$ , имеем

$$Q(L) = \frac{\frac{1}{2}p_{dark}}{\eta(L) + p_{dark}}. \tag{17}$$

Взаимная информация между Алисой и Бобом после исправления ошибок случайными кодами не превышает пропускной способности классического симметричного бинарного канала связи с величиной ошибки  $Q(L)$ . Имеем

$$I(A; B) \leq C_{class}(Q) = 1 - H(Q(L)), \tag{18}$$

$$H(x) = -x \log x - (1 - x) \log(1 - x). \tag{19}$$

Проведём анализ действий подслушивателя. Рассмотрим теперь действия подслушивателя. Поскольку фотодетекторы на приемной стороне не различают число фотонов, то Боб может следить лишь за сохранением общего числа посылок на приёмной стороне при известной длине линии связи. Вероятность потерь или доля посылок, исчезающих в канале связи длины  $L$  — есть

$$p_{loss}(L) = \sum_{k=1}^{\infty} p_k(1 - \Gamma(L))^k, \quad (20)$$

$$\Gamma(L) = 10^{-\frac{\alpha L}{10}}. \quad (21)$$

здесь  $\alpha \approx 0.2$  дБ/км — константа затухания в одномодовом оптоволокне. Для когерентного состояния доля потерянных посылок составляет  $p_{loss}(L) = \epsilon^{-\mu\Gamma} - \epsilon^{-\mu}$  (при  $L \rightarrow \infty, \Gamma(L) \rightarrow 0, p_{loss}(L) \rightarrow 1 - \epsilon^{-\mu}$  — исходная общая доля непустых посылок). Будем рассматривать ситуацию при больших длинах ( $L > L_1$  ( $p_{loss}(L_1) = p_1$ ), когда Ева может блокировать все однофотонные посылки, при атаке на которые она неизбежно производила бы ошибки на приёмной стороне. С дальнейшим ростом длины линии подслушиватель может блокировать двух, трёх,  $k$ -фотонные посылки. Иначе говоря, при длинах  $L < L_1 < L < L_2 < L \dots < L_k \dots$  Ева может блокировать частично, а начиная с некоторой длины, полностью  $k$ -фотонные посылки. Зависимости длин  $L_k$  от среднего числа фотонов  $\mu$  в когерентном состоянии приведены на рис. 6.

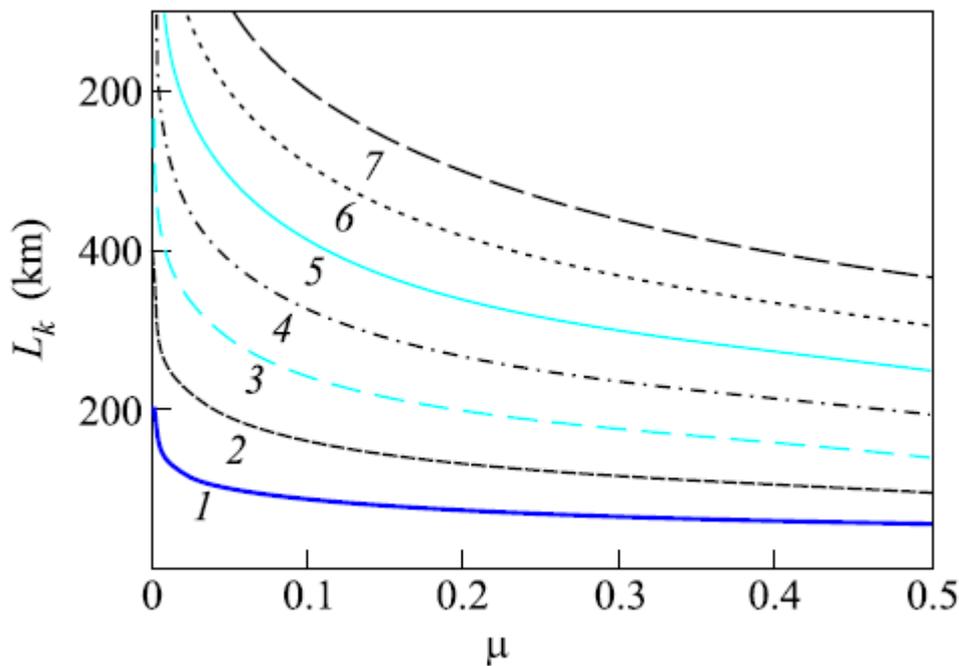


Рис. 6. Зависимость длины линии  $L_k$  от среднего числа фотонов  $\mu$  в когерентном состоянии, начиная с которых Ева может блокировать посылки, содержащие  $k$  фотонов.

Доля оставшихся посылок при длине  $L$ , которые Ева не может блокировать и вынуждена сохранить, составляет

$$p_k(L) = p_k(1 - \theta(p_{loss}(k, L))) + (p_k - p_{loss}(k, L))\theta(p_{loss}(k, L))\theta(p_k - p_{loss}(k, L)). \quad (22)$$

Далее из каждой посылки, содержащей  $k > 1$  фотонов, Ева один фотон направляет к Бобу через свой канал связи с меньшими потерями (в предельном случае вообще без

потерь), а остальные оставляет у себя в квантовой памяти до процедуры разглашения базисов легитимными пользователями. Однако даже после разглашения базисов из-за неортогональности состояний внутри базиса Ева не будет достоверно знать каждый передаваемый бит.

Проведём расчёт квантовой пропускательной способности квантового канала связи. При длине линии связи  $L > L_1$ , после разглашения базисов, Ева имеет в каждой ячейке квантовой памяти состояние

$$\begin{aligned} p_E(0, b) &= p \oplus_{k=2}^{\infty} p_k(L) (|0, b\rangle^{\oplus(k-1)})^{\oplus(k-1)} \langle 0, b|, \\ p_E(1, b) &= p \oplus_{k=2}^{\infty} p_k(L) (|1, b\rangle^{\oplus(k-1)})^{\oplus(k-1)} \langle 1, b|. \end{aligned} \quad (23)$$

здесь базис  $b$  считается известным.

Количество информации в битах на одну посылку  $I(;)$ , которое может быть получено из ансамбля квантовых состояний (23), ограничено сверху фундаментальной границей Холево, которая является достижимой и совпадает с классической пропускной способностью  $\bar{C}(L)$  квантового канала связи между Алисой и Евой с информационными состояниями (24) [14]. Имеем

$$I(A; E) \leq \bar{C}(L) = \sum_{m=2}^{\infty} \bar{p}_m(L) \bar{C}(\cos^{m-1}(\alpha)). \quad (24)$$

Здесь

$$\begin{aligned} \bar{p}_m(L) &= (L)/N(L), N(L) = \sum_{m=2}^{\infty} p_m(L), \\ \bar{C}(x) &= \left(-\frac{1-x}{2}\right) \log\left(\frac{1-x}{2}\right) - \\ &\quad - \left(\frac{1+x}{2}\right) \log\left(\frac{1+x}{2}\right) \end{aligned} \quad (25)$$

классическая пропускная способность квантового канала связи [14]. Из (24), (25) следует, что информация Евы о передаваемом ключе фактически определяется энтропией фон Неймана источника на передающей стороне Алисы, в котором распределение по числам заполнения фотонов сдвинуто на единицу, поскольку один фотон должен быть направлен на приёмную сторону к Бобу.

Распространение ключей возможно [14], если  $I(;) < I(;)$ . Критическая длина линии определяется как корень уравнения  $I(;) = I(;)$ , имеем

$$C_{class}(Q) = \bar{C}(L), \quad (26)$$

$$1 - H(Q(L)) = \sum_{m=2}^{\infty} \bar{p}_m(L) \bar{C}(\cos^{m-1}(\alpha)). \quad (27)$$

Зависимости взаимных информации  $I(A; E)$  и  $I(A; B)$  от длины оптоволоконной линии связи при различной вероятности темновых отсчётов представлены на 7. Критическая длина линии связи, до которой возможно распределение ключей, определяется точкой, где разность  $I(A; B) - I(A; E)$  обращается в нуль. Фактически разность  $I(A; B) - I(A; E)$  представляет собой количество информации в битах, которое является ключом.

Как следует из рис. 5, при вероятности темновых отсчетов  $p_{dark} = 10^{-5}$  отсч/строб, предельная длина линии связи составляет  $\approx 80$  км. Такой уровень темновых отсчётов является типичным при охлаждении лавинных фотодетекторов до температуры

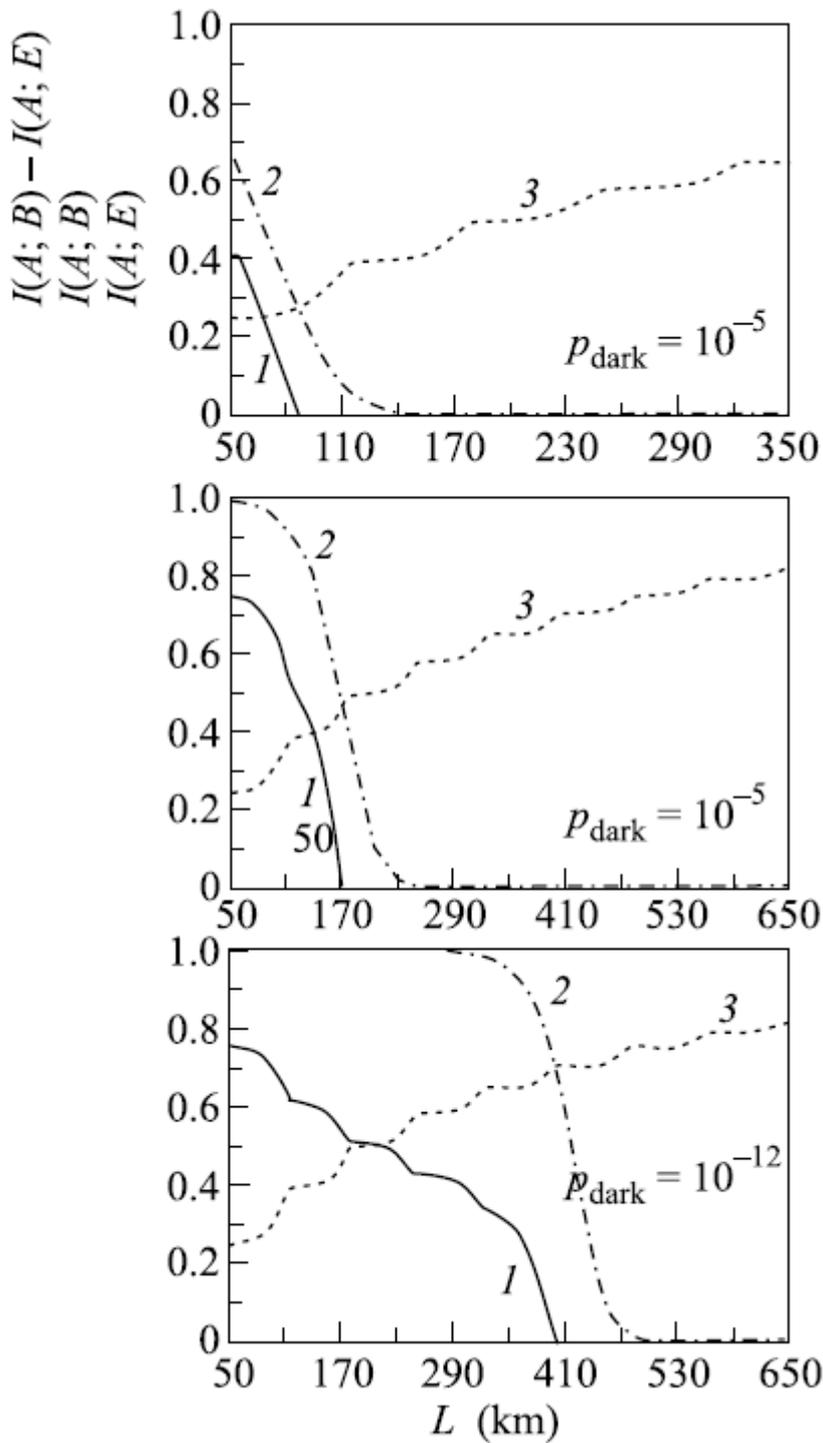


Рис. 7. Кривые 1 отвечают зависимости  $I(A; B) - I(A; E)$  от длины линии связи  $L$ , кривые 2 — зависимостям  $I(A; B)$  и 3 — зависимостям  $I(A; E)$ . Вероятности темновых отсчётов приведены непосредственно на рисунке. Квантовая эффективность фотодетекторов и среднее число фотонов в когерентном состоянии одинаковы для всех кривых и равны соответственно  $\eta = 0.1$ ,  $\mu = 0.2$ . Угол между состояниями  $\alpha = \pi/8$ .

$\approx -50 - 60$ . При охлаждении до азотных температур достигим уровень темновых шумов  $p_{dark} = 10^{-7}$  отсч/строб. Предельная длина линии связи в этом случае составляет  $\approx 170$  км. И, наконец, при вероятности темновых отсчётов  $p_{dark} = 10^{-12}$  отсч/строб достижима длина в 400 км. Такой уровень темновых отсчётов достигается в ряде экспериментов для сверхпроводящих детекторов на основе  $NbN$ .

Сделаем замечание по стратегии передачи вероятностной информации. Описанная выше стратегия даёт Еве вероятностную информацию о битах ключа [14]. Ева может в принципе использовать стратегию, которая даёт ей достоверную информацию о каждом передаваемом бите. Поскольку имеется 4 базиса,  $+L$ ,  $\times L$  и  $+R$ ,  $\times R$ , и внутри базисов состояния неортогональны, то для того, чтобы получить достоверную информацию, Еве необходима как минимум пятифотонная компонента. Ева использует 4 фотона для измерений, которые аналогичны (10). Пятый фотон направляется к Бобу только в том случае, если получен результат с определенным исходом для измерений над всеми четырьмя фотонами (исходы  $A_{0,1,+L}$ ,  $A_{0,1,\times L}$  и  $A_{0,1,+R}$ ,  $A_{0,1,\times R}$ ). Это даёт возможность Еве после раскрытия базисов однозначно определить передаваемый бит. Если получен результат измерения с неопределённым исходом  $0,b$ , хотя бы для одного из четырёх фотонов, то посылка блокируется. Вероятность исхода с определенным результатом для четырёх фотонов  $-(1 - \cos(\alpha))^4$  (например, при  $\alpha = \pi/8$  эта величина меньше  $10^{-4}$ ). Это означает, что Ева должна будет блокировать почти все пятифотонные посылки (долю посылок  $> 1 - 10^{-4}$ ).

Такая стратегия возможна, если длина линии связи превышает  $L > L_5$ . Однако, как следует из рис. 6 и рис. 7 при типичных рабочих значениях среднего числа фотонов в состоянии  $\mu = 0.1 - 0.2$ , взаимная информация  $I(A; E)$  сравнивается со взаимной информацией  $I(A; B)$  при меньших длинах, чем  $L_5$ , поэтому данная атака Евы неэффективна. Уже при меньших длинах определяющую роль начинают играть темновые отсчёты, которые, по существу, определяют критическую длину.

Рассмотрим расщепление числа фотонов. Любая экспериментальная реализация с использованием фотонов протокола распределения квантового ключа с двумерными квантовыми состояниями должна идеально выполняться с однофотонным источником. К сожалению, это очень сильное требование с современными технологиями, и нужно проектировать способ экспериментальной аппроксимации однофотонного источника. Несмотря на то, что распределение квантовых ключей оказалось безоговорочно безопасным, это может быть не так, если технология честных сторон не идеальна.

В большинстве существующих реализаций однофотонный импульс аппроксимируется слабым когерентным импульсом  $|\mu e^{i\theta}\rangle$ . Как сказано выше, и поскольку нет абсолютной опорной фазы, состояние, наблюдаемое Бобом и Евой, представляет собой некогерентную смесь многофотонных состояний с пуассоновскими вероятностями. Затем Ева может выполнить измерение числа фотонов без сноса, сохранить один из фотонов, когда найдено многофотонное состояние, и передать остальным Бобу. Обратите внимание, что действие Евы не обнаружено Бобом, если предполагается, что он имеет доступ только к средней скорости обнаружения, а не к статистике фотонов, которые он получает. Предполагаем, что Ева способна контролировать потери на линии, соединяющей Алису и Боба (или, что эквивалентно, она может отправлять фотоны Бобу по линии без потерь). В этой ситуации Ева может выполнить так называемую атаку на расщепление числа фотонов, которая, как показано ниже, ограничивает безопасность многих известных существующих протоколов.

Рассмотрим протокол BB84. В протоколе BB84 [15] Алиса выбирает случайным образом между двумя взаимно несмещенными основаниями, в которых она кодирует классический бит. Обозначая  $|\pm x\rangle$  ( $|\pm y\rangle$ ) собственные векторы  $\sigma_x$  ( $\sigma_y$ ) с собственным значением  $\pm 1$ , она может закодировать логический 0 в либо  $|+x\rangle$ , либо  $|+y\rangle$ , а 1 в  $|-x\rangle$  или

$| -y \rangle$ ). Она отправляет кубит Бобу, который измеряет случайным образом в  $x$  или  $y$  основе. Затем они сравнивают базис, и когда они совпадают, бит принимается. Таким образом, половина символов отбрасывается и, в отсутствие возмущений, они заканчиваются общим секретным ключом. В практических ситуациях, а также из-за наличия ошибок и, возможно, шпиона, необходимо применять некоторые методы коррекции ошибок и усиления конфиденциальности, чтобы извлечь более короткий полностью безопасный ключ.

Теперь давайте посмотрим, как Ева может воспользоваться многофотонными импульсами. Алиса посылает импульс с  $\mu \ll 1$ , кодирующим классический бит (скажем, при поляризации света). Ева выполняет измерение количества фотонов, а когда обнаруживаются два или более фотонов, она берет один и передает остальным Бобу по своей линии без потерь. Ева хранит фотон в квантовой памяти и ждёт до примирения базиса. Как только база объявлена, ей нужно только различать два ортогональных состояния, которые можно детерминировать. Таким образом, для всех многофотонных импульсов Ева получает всю информацию о посланном бите. Если Алиса и Боб в принципе связаны линией с потерями, Ева может блокировать некоторые импульсы одиночных фотонов и направить многофотонные импульсы, на которых она может получить всю информацию, своей линией без потерь. Таким образом, Алиса и Боб не замечают никаких изменений в ожидаемой исходной скорости, и Ева остается незамеченной. Когда потери таковы, что Ева может блокировать все однофотонные импульсы, протокол перестает быть безопасным.

Обозначим через  $\alpha$  потери в дБ за км на линии. Ожидаемая скорость передачи со стороны Боба даётся по уравнению

$$R_{Bob} = \mu 10^{-\delta/10} \text{ [photons/pulse] } , \quad (28)$$

где  $\delta = \alpha d$  – полное затухание в дБ квантового канала длины  $d$ . Ева применит атаку расщепления числа фотонов на долю  $1 - q$  импульсов. Поскольку она не хочет быть обнаруженной, сырая ставка не должна изменяться, то есть она должна выбрать  $q$  таким образом, чтобы

$$R_{Bob}^{PNS} = q\mu + (1 - q) R_{BB84} = R_{Bob} , \quad (29)$$

где  $R_{BB84} \equiv \sum_{n=2}^{\infty} p_n(n - 1)$ . Информация Евы равна нулю, когда она ничего не делает, и одна для атаки на расщепление числа фотонов, то есть, обозначая  $S_{BB84} \equiv \sum_{n=2}^{\infty} p_n$ ,

$$I_{Eve}(q) = \frac{(1 - q) S_{BB84}}{q + (1 - q) S_{BB84}} . \quad (30)$$

Если потери таковы, что  $q$  может быть равно нулю в уравнении (29) (все однофотонные импульсы могут быть заблокированы), Ева получает всю информацию, не будучи обнаруженной. Критическое затухание,  $\delta_c$ , затем задается условием  $R_{BB84} = R_{Bob}$ . На рис. 8 показана зависимость  $I_{Eve}$  от  $d$  для  $\mu = 0.1$  и  $\alpha = 0.25\text{dB/km}$ . Критическое затухание в этом случае равно  $\delta_c = 13\text{ dB}$ , а соответствующее расстояние  $d_c = 52\text{ км}$ . Здесь необходимо подчеркнуть два важных момента. Во-первых, не претендуем на оптимальность стратегий расщепления числа фотонов, которые рассматриваем в этом разделе, с точки зрения информации Евы о потерях ниже  $\delta_c$ . Действительно, когда потери начинают иметь значение, Еве удобнее выполнять атаку расщепления числа фотонов на все многофотонные импульсы и блокировать некоторые из однофотонных импульсов. Можно видеть, что это немного увеличивает  $I_{Eve}$ , но не изменяет критическое расстояние. Во-вторых, можно предложить альтернативные и более консервативные определения критического расстояния. Для простоты не рассматриваем возмущений в отсутствие

Евы, то есть информация Алиса-Боб,  $I_{AB}$ , является единичной. Но в реальных ситуациях и из-за наличия ошибок (например, из-за детектора и оптического шума) это неверно, и критическое расстояние соответствует точке, где  $I_{Eve} = I_{AB}$ . Если частота ошибок важна, это расстояние может быть меньше указанного здесь. В любом случае, для ослабления канала, превышающего  $\delta_c$ , реализация протокола BB84 с использованием слабых когерентных импульсов небезопасна.

Можно задаться вопросом, возможна ли эта атака только потому, что информация закодирована при поляризации света. Однако те же рассуждения действительны и для других кодировок, таких как, например, в схеме временного бункера. Там информация передается с использованием относительной фазы между двумя слабыми когерентными импульсами, которые посылаются через волокно. В принципе, состояние, покидающее сторону Алисы,

$$|\phi\rangle = |\mu e^{i\theta}\rangle |\mu e^{i\theta} e^{i\phi}\rangle, \quad (31)$$

где  $\phi = 0, \pi$  ( $\phi = \pm\pi/2$ ) соответствуют  $\pm x$  ( $\pm y$ ). Но поскольку фазовая ссылка отсутствует, эффективное состояние, наблюдаемое Евой и Бобом,

$$\rho = \int \frac{d\theta}{2\pi} |\phi\rangle \langle\phi| = \sum_n p(n, 2\mu) |\varphi_n(\phi)\rangle \langle\varphi_n(\phi)|, \quad (32)$$

где  $p(n, 2\mu)$  – вероятности Пуассона среднего числа фотонов  $2\mu$  и

$$|\varphi_n(\phi)\rangle = \sum_{m=0}^n \sqrt{\binom{n}{m}} \frac{1}{2^n} e^{im\phi} |n-m\rangle |m\rangle. \quad (33)$$

Можно определить оператор рождения и уничтожения

$$\begin{aligned} a^\dagger(\phi) &= \frac{a_1^\dagger + e^{i\phi} a_2^\dagger}{\sqrt{2}}, \\ a(\phi) &= \frac{a_1 + e^{-i\phi} a_2}{\sqrt{2}}, \end{aligned} \quad (34)$$

так что действие на двухмодовое вакуумное состояние даёт  $a^\dagger(\phi) |0, 0\rangle = |\varphi_1(\phi)\rangle$ . Нетрудно видеть, что

$$|\varphi_n(\phi)\rangle = \frac{(a^\dagger(\phi))^n}{\sqrt{n!}} |0, 0\rangle, \quad (35)$$

$[a^\dagger, a] = 1$  и  $\langle\varphi_{n'}(\phi)|\varphi_n(\phi)\rangle = \delta_{n,n'}$ . Состояние Боба задаётся выражением типа, умножающим среднее число фотонов на затухание канала. Таким образом, ситуация такая же, как и в предыдущей схеме кодирования поляризации. Ева может подсчитать общее количество фотонов в двух (ныне временных) режимах, аналогично тому, как это было в предыдущем измерении числа фотонов для поляризации, не заметив Боба. Когда обнаруживается «более одного» фотона, то есть она проектируется в  $|\varphi_2\rangle$ , она сохраняет одну копию состояния в её квантовой памяти до согласования базиса. Очевидно, что уравнения и критические значения в этом случае Аналогичны найденным выше для схемы кодирования поляризации.

Рассмотрим протокол B92. Альтернативная схема распределения квантового ключа задается протоколом B92. Классический бит просто кодируется Алисой с использованием двух неортогональных состояний  $|\psi_0\rangle$  и  $|\psi_1\rangle$  с  $\langle\psi_0|\psi_1\rangle \neq 0$ . Не теряя общности, будет принимать

$$|\psi_0\rangle = \begin{pmatrix} \cos \frac{\eta}{2} \\ \sin \frac{\eta}{2} \end{pmatrix} \quad |\psi_1\rangle = \begin{pmatrix} \cos \frac{\eta}{2} \\ -\sin \frac{\eta}{2} \end{pmatrix}, \quad (36)$$

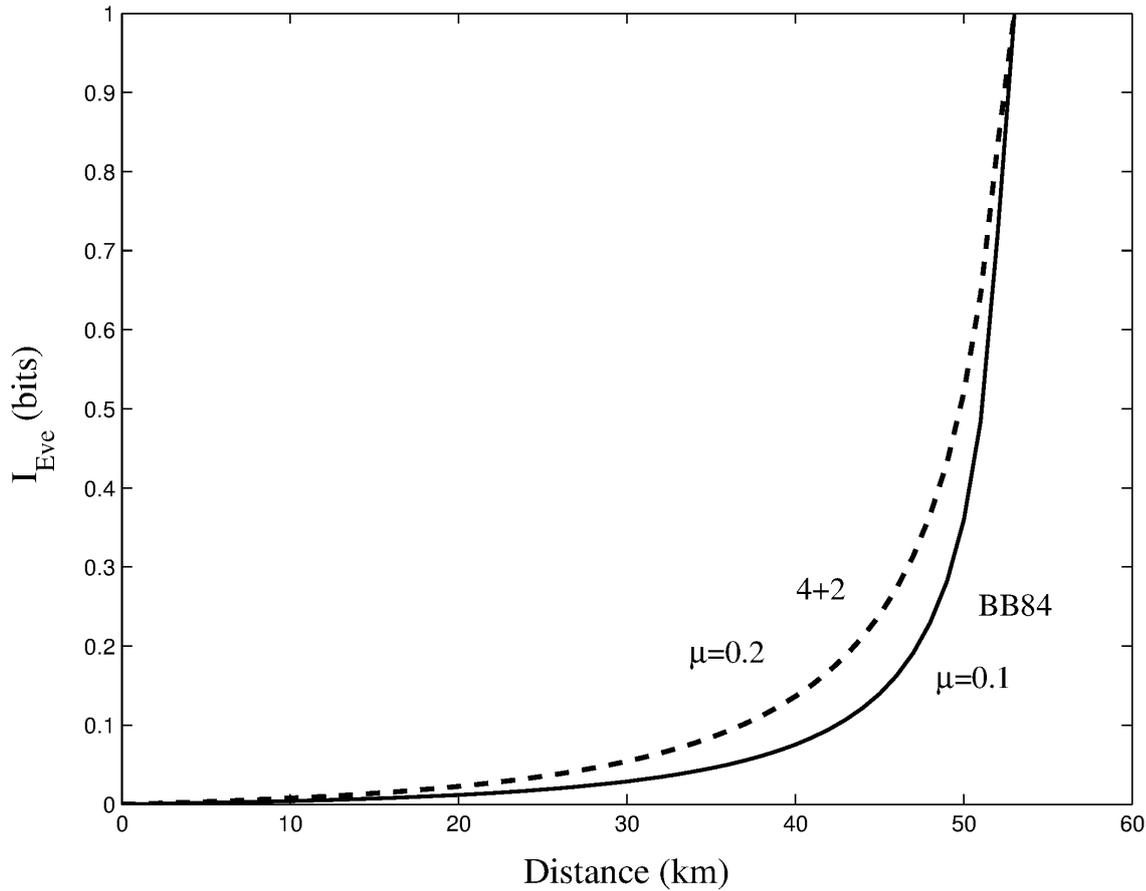


Рис. 8. Информация Евы как функция расстояния для атак с разбиением числа фотонов, описанных в тексте.

с  $0 \leq \eta \leq \pi/2$  и перекрытие является  $|\langle \psi_0 | \psi_1 \rangle| = \cos \eta$ . Боб должен различать два неортогональных квантовых состояния, и это можно сделать только с некоторой вероятностью. Оптимизация измерения этой вероятности определяется следующими положительными операторами, суммирующими до одного,

$$\begin{aligned}
 \Pi_0 &= \frac{1}{1 + \cos \eta} |\psi_1^\perp\rangle \langle \psi_1^\perp| \\
 \Pi_1 &= \frac{1}{1 + \cos \eta} |\psi_0^\perp\rangle \langle \psi_0^\perp| \\
 \Pi_2 &= -\Pi_0 - \Pi_1,
 \end{aligned} \tag{37}$$

где  $|\psi^\perp\rangle$  обозначает состояние, ортогональное  $|\psi\rangle$ . Когда результатом измерения Боба является тот, который связан с  $\Pi_i$ , с  $i = 0, 1$ , он знает, что состояние было  $|\psi_i\rangle$ . Вероятность получить неубедительный результат равен перекрытию между состояниями,  $p_2 = \langle \psi_0 | \Pi_2 | \psi_0 \rangle = \langle \psi_1 | \Pi_1 | \psi_1 \rangle = \cos \eta$ . Таким образом, Алиса и Боб будут принимать отправленный бит только для тех случаев, когда измерение Боба даёт окончательный результат. Вероятность принятия равна  $p_{ok} = 1 - \cos \eta$ , а для BB84 эта вероятность равна половине. В следующих строках описывается атака разбиения числа фотонов на Еву. В слабой схеме кодирования импульсов этот протокол явно небезопасен. То, что Ева может просто сделать, — это выполнить такое же однозначное измерение, как и Боб. Когда будет найден окончательный результат, она узнает состояние, и она подготовит его копию со стороны Боба. Когда Ева не может определить состояние, она блокирует пульс. Конечно, как только у нас есть некоторые потери в канале, Алиса и Боб не могут обнаружить подслушивание (так как они предполагают, что отсутствие

сигнала связано с потерями), а протокол безопасен. Обратите внимание, что в этом случае Ева не нуждается в квантовой памяти и канале без потерь.

Рассмотрим протокол 4+2. Третий протокол распространения квантового ключа был предложен, комбинируя некоторые идеи схем В92 и ВВ84. Как и в протоколе ВВ84, есть четыре состояния, сгруппированные в два набора:  $\{|0_a\rangle, |1_a\rangle\}, \{|0_b\rangle, |1_b\rangle\}$ . Однако, как и в В92, состояния в каждом наборе не ортогональны, их перекрытия равны  $|\langle 0_a | 1_a \rangle| = |\langle 0_b | 1_b \rangle| = \cos \eta$ . Ситуация изображена на рис. 9, четыре состояния лежат на одной параллели блоховской сферы. Таким образом, Алиса выбирает случайным образом, в каком из двух наборов бит кодируется. Боб произвольно выполняет одну из двух POVM, различающих два состояния каждого набора. После согласования базиса они определяют все случаи, когда Боб применил правильные измерения, получив окончательный результат. На первый взгляд, этот протокол кажется более устойчивым к атакам с расщеплением числа фотонов: по сравнению с случаем ВВ84, Ева может хранить некоторые фотоны, но её измерение после примирения баз не может быть окончательным. И по сравнению с В92, она не знает, какое из двух измерений должно быть применено. Однако из-за особой геометрии множеств состояний эта схема не даёт никакого преимущества по сравнению с двумя предыдущими. Но прежде чем описывать атаку Евы, давайте покажем, как трёхмерный результат, описанный в (37), можно интерпретировать как конкатенацию двух измерений двух результатов.

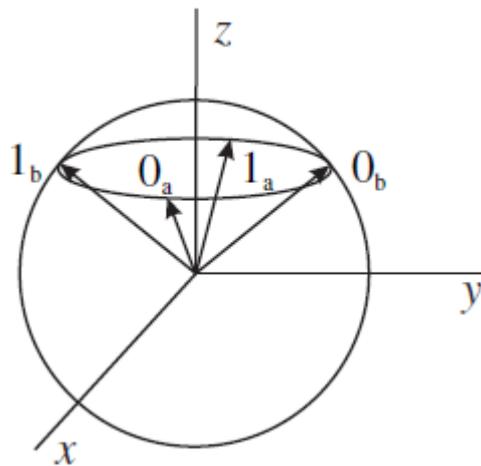


Рис. 9. Набор состояний, необходимых для протокола 4 + 2.

Эффект любого квантового измерения может быть представлен набором операторов  $\{A_i\}$ , удовлетворяющих  $\sum_i A_i A_i^\dagger = I$ . Если начальное состояние  $\rho$ , вероятность любого результата, скажем,  $i$ , равна

$$p_i = \text{tr} \left( A_i \rho A_i^\dagger \right), \tag{38}$$

и состояние превращается в

$$\rho_i = \frac{1}{p_i} A_i \rho A_i^\dagger. \tag{39}$$

Рассмотрим состояния POVM, описываемый операторами (37), может быть эффективно заменен последовательностью двух измерений с двумя результатами. Во-первых, применяется измерение, описанное операторами

$$\begin{aligned} A_{ok} &\equiv \frac{1}{\sqrt{1 + \cos \eta}} (|+x\rangle \langle \psi_1^\pm| + |-x\rangle \langle \psi_0^\pm|) \\ A_1 &\equiv \sqrt{-A_{ok} A_{ok}^\dagger}. \end{aligned} \tag{40}$$

Эффект этого первого измерения заключается в следующем: с вероятностью  $p_{ok} = 1 - \cos \eta$  состояние  $|\psi_0\rangle$  ( $|\psi_1\rangle$ ) отображается в  $|+x\rangle$  ( $|-x\rangle$ ). Эта операция часто называется фильтрацией, и она эквивалентна случаям, когда уравнение (37) даёт окончательный результат. Когда результат  $ok$  получен, говорят, что состояния прошли фильтр. Если это так, то для различения двух состояний достаточно стандартного измерения фон Неймана на основе  $x$ .

Вернемся к протоколу  $4 + 2$  и рассмотрим фильтр для состояний в множестве  $a$ , отправляя это состояние в базу  $x$ . Нетрудно видеть, что один и тот же фильтр отображает состояния из множества  $b$  в  $|\pm y\rangle$ . Таким образом, BB84-подобная ситуация восстанавливается.

Теперь легко спроектировать атаку на разделение числа фотонов.

Во-первых, Ева считает количество фотонов. Как и в случае с B92, она применяет фильтрацию результатов двух исходов при получении многофотонного импульса. Когда результат является окончательным, она подаёт полученный фотон в квантовую память и передает остальную часть фотонов Бобу. Затем, как и в случае с протоколом BB84, она ждет примирения базиса и выполняет правильное измерение фон Неймана, позволяя ей прочесть бит. Для справедливого сравнения всегда применяем тот же ключ при отсутствии Евы, как в BB84, используя  $\mu = 0.1$ . В этом случае это означает, что должны иметь

$$\mu_{BB84} = \mu_{4+2}(1 - \cos \eta) . \quad (41)$$

Аналогичным образом, как и выше для случая BB84, можно вычислить информацию Евы для этой атаки. Он почти совпадает с найденным для протокола BB84, а критическое расстояние опять равно  $\delta_c = 52$  км (см. рис. 8). Действительно, критическое расстояние оказывается совершенно независимым от степени неортогональности между состояниями в протоколе  $4 + 2$ , если наложить равенство исходных скоростей (41). Анализ протокола  $4 + 2$  завершает данный раздел. Все изученные схемы распределения квантовых ключей не гарантируют безопасную передачу ключа, когда ослабление канала составляет около 15 дБ. К сожалению, использование неортогональных состояний недостаточно для избежания атак Евы. Критическое расстояние в основном соответствует точке, где скорость передачи со стороны Боба может быть имитирована числом многофотонных импульсов, покидающих лабораторию Алисы.

Проведём численные расчёты физических характеристик квантового канала связи. В работе предложена теория квантовых эффектов для описания процессов передачи и переноса квантовой информации между двумя или несколькими пользователями квантовой сети. Обсудим физические аспекты различных систем квантовой криптографии. В настоящее время в связи с возрастающими объёмами передаваемой оптической информации по телекоммуникационным и компьютерным сетям становится актуальной проблема создания новых криптосистем для кодирования информации. Привлекательность использования оптических методов передачи информации состоит в высоком быстродействии и пропускной способности оптических каналов связи, совершенных оптических методах приёма, обработки, хранения, преобразования, шифрования когерентной оптической информации. Современные системы передачи информации основаны на быстродействующих оптоволоконных линиях связи. Поэтому представляется перспективным разрабатывать оптические схемы кодирования не только классической, но и квантовой информации.

Рассмотрим методы численных расчётов характеристик квантовых криптосистем. Рассмотрим численные решения моделей для шифрования квантовой информации при переносе информации на большие расстояния между системами. На рис. 10 представлена зависимость длины линии  $L_c$  симметричного бинарного канала связи от среднего числа фотонов  $\mu$  в когерентном состоянии, начиная с которых Ева может блокировать

ПОСЫЛКИ.

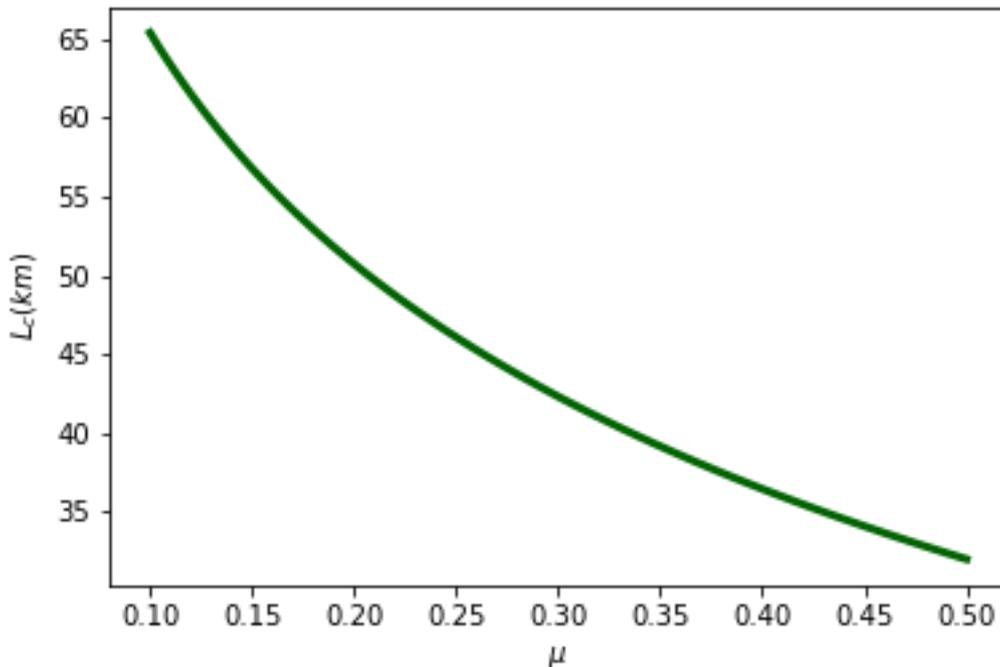


Рис. 10. Зависимость длины линии  $L_c$  симметричного бинарного канала связи от среднего числа фотонов  $\mu$ , начиная с которых Ева может блокировать посылки.

На рис. 11 представлена зависимость длины линии  $L_k$  от среднего числа фотонов  $\mu$  в когерентном состоянии, начиная с которых Ева может блокировать посылки, содержащие  $k$  фотонов.

На рис. 12 представлена зависимость  $I(A; B)$  от длины линии связи  $L$ . Вероятности темновых отсчётов равны а)  $p_{dark} = 1.0 \cdot 10^{-5}$ , б)  $p_{dark} = 1.0 \cdot 10^{-7}$ , в)  $p_{dark} = 1.0 \cdot 10^{-8}$ , д)  $p_{dark} = 1.0 \cdot 10^{-12}$ . Квантовая эффективность фотодетекторов и среднее число фотонов в когерентном состоянии одинаковы для всех кривых и равны соответственно  $\eta = 0.1$ ,  $\mu = 0.2$ . Угол между состояниями  $\alpha = \pi/8$ .

На рис. 13 представлены зависимости  $I(A; B)$ ,  $I(A; E)$ ,  $I(A; B) - I(A; E)$  от длины линии связи  $L$ . Вероятности темновых отсчётов равны а)  $p_{dark} = 0.85 \cdot 10^{-5}$ , б)  $p_{dark} = 0.85 \cdot 10^{-7}$ , в)  $p_{dark} = 0.85 \cdot 10^{-8}$ , д)  $p_{dark} = 0.85 \cdot 10^{-10}$ . Квантовая эффективность фотодетекторов и среднее число фотонов в когерентном состоянии одинаковы для всех кривых и равны соответственно  $\eta = 0.1$ ,  $\mu = 0.2$ . Угол между состояниями  $\alpha = \pi/8$ .

В основе различных схем переноса квантовой информации между квантовыми системами лежит возможность переноса квантового волнового пакета. Для переноса квантовой информации вначале необходимо создать квантовый канал связи между двумя тождественными квантовыми системами (атомами или фотонами). Затем с помощью некоторой последовательности квантовых процессов, которые возможно протекают одновременно, происходит перенос квантовой информации. Физический быстропротекающий процесс можно использовать для переноса информации с быстро исчезающих носителей (например, фотонов) на частицы более удобные для хранения информации (ионы).

Физический процесс квантовой коммуникации представляет собой совокупность квантовых эффектов кодирования, переноса и декодирования квантовой информации между двумя тождественными системами.

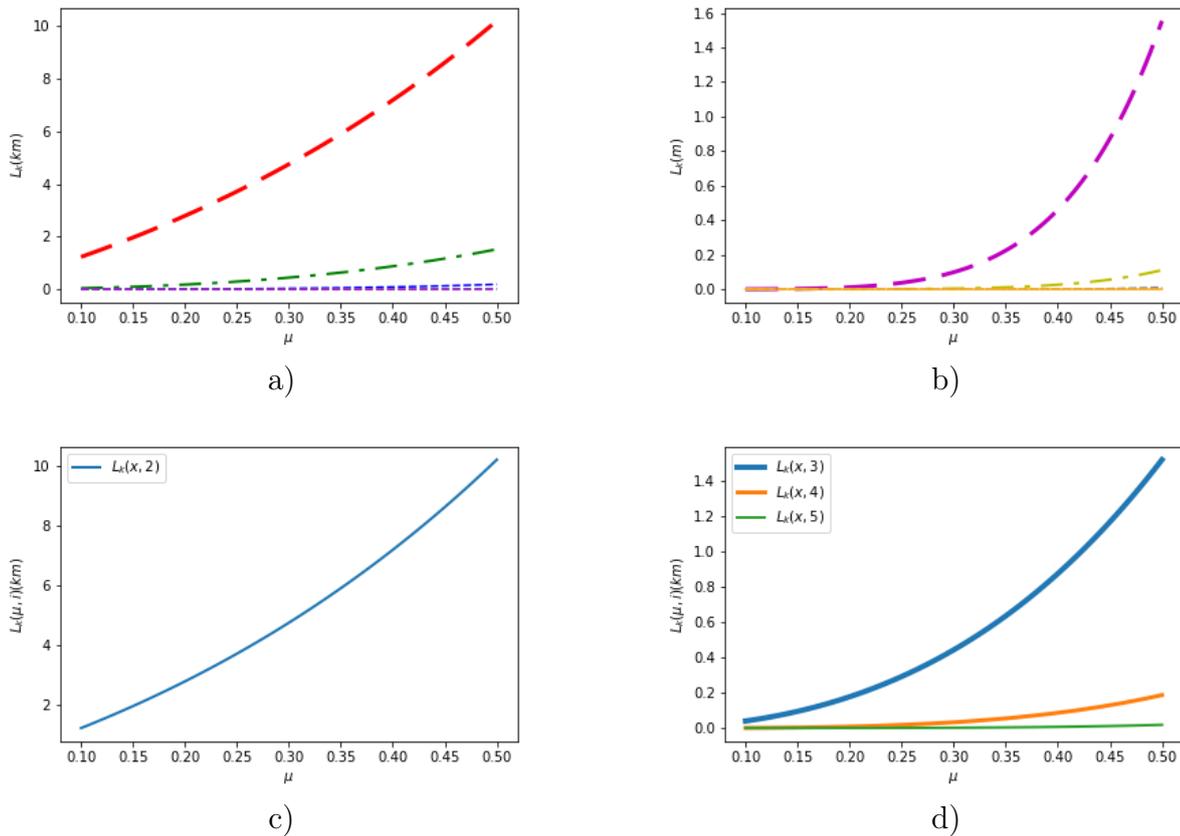


Рис. 11. Зависимость длины линии  $L_k$  от среднего числа фотонов  $\mu$  в когерентном состоянии, начиная с которых Ева может блокировать посылки, содержащие  $k$  фотонов. а)  $L_k(\mu, 2)$ ,  $L_k(\mu, 3)$ ,  $L_k(\mu, 4)$ ,  $L_k(\mu, 5)$ , б)  $L_k(\mu, 6)$ ,  $L_k(\mu, 7)$ ,  $L_k(\mu, 8)$ ,  $L_k(\mu, 9)$ , в)  $L_k(\mu, 2)$ , д)  $L_k(\mu, 3)$ ,  $L_k(\mu, 4)$ ,  $L_k(\mu, 5)$ .

## Заключение

В работе рассматривались основы разработки дистанционных курсов на примере дистанционного курса по физическим основам квантовой криптографии. Рассмотрены аспекты создания и применения электронных образовательных ресурсов по квантовой криптографии.

В качестве подтверждения гипотезы исследования спроектирован дистанционный курс по физическим основам квантовой криптографии, позволяющий проводить обучение основам квантовой криптографии по традиционной, смешанной и дистанционной формам обучения с применением компьютеров.

В работе построена теоретическая модель квантового канала связи. Простейшим эффектом квантовой связи является передача квантовых состояний. Для того чтобы передавать квантовые состояния атомных систем необходимо рассчитать вероятности квантовых состояний электрона в атоме при различных значениях квантовых чисел. Рассмотрены различные виды защиты от атак с расщеплением числа фотонов. Выполнены численные расчёты зависимости длины линии связи от среднего числа фотонов в когерентном состоянии, начиная с которых Ева может блокировать посылки, содержащие фиксированное число фотонов. В работе составлена компьютерная программа для расчёта характеристик секретного квантового канала связи. Исследованы оптические характеристики квантового канала в зависимости от типа канала и начальных состояний передающей и принимающей систем.

Безоговорочная безопасность систем квантовой криптографии основана на некото-

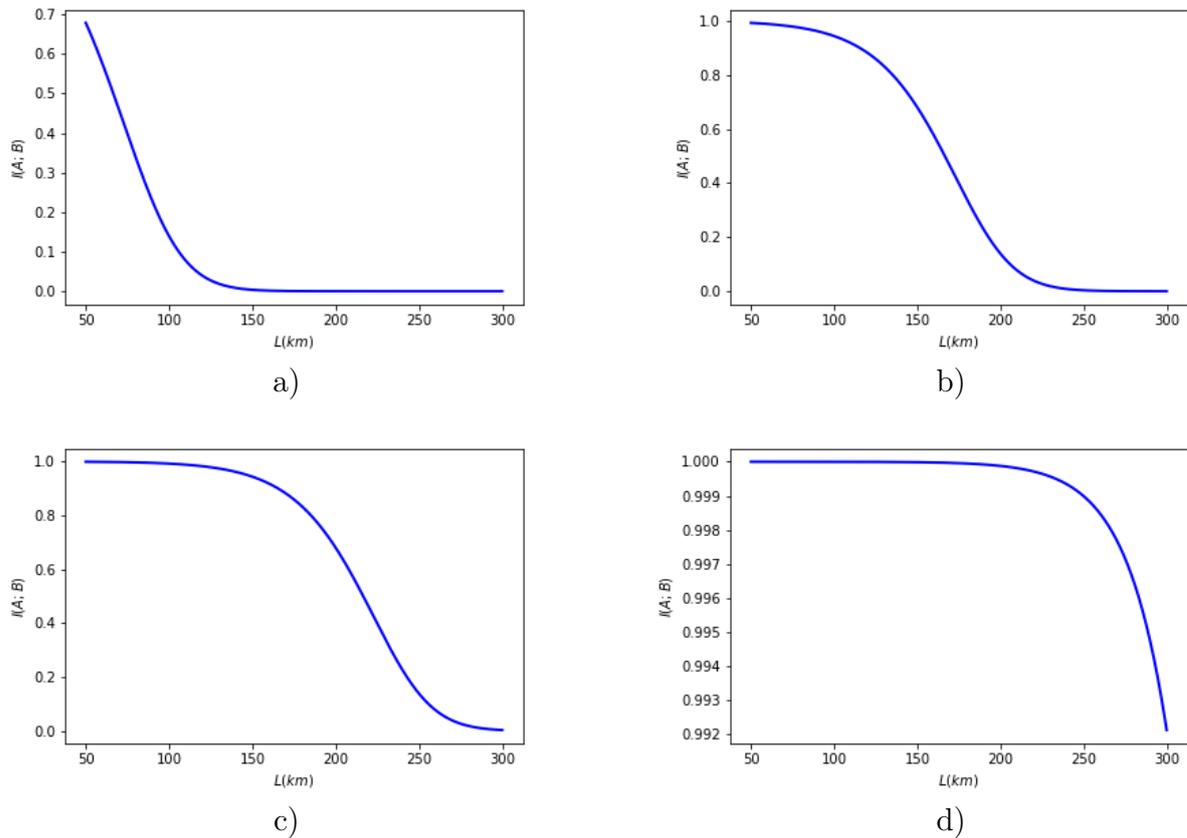


Рис. 12. Зависимость  $I(A; B)$  от длины линии связи  $L$ . Вероятности темновых отсчётов равны а)  $p_{dark} = 1.0 \cdot 10^{-5}$ , б)  $p_{dark} = 1.0 \cdot 10^{-7}$ , в)  $p_{dark} = 1.0 \cdot 10^{-8}$ , д)  $p_{dark} = 1.0 \cdot 10^{-12}$ . Квантовая эффективность фотодетекторов и среднее число фотонов в когерентном состоянии одинаковы для всех кривых и равны соответственно  $\eta = 0.1$ ,  $\mu = 0.2$ . Угол между состояниями  $\alpha = \pi/8$ .

рых экспериментальных предположениях, которые не могут быть достигнуты с помощью современной технологии. Таким образом, в более реалистичном сценарии честным сторонам приходится иметь дело с аппроксимированными однофотонными источниками, шумными каналами, неэффективными детекторами и т. д. При этом никаких ограничений на технологию прослушивания не следует принимать. Это открывает возможность для альтернативных атак с перехватом, используя технологические недостатки Алисы и Боба. Действительно, используя в качестве эталона схему BB84 с  $\mu = 0.1$ , все известные протоколы становятся небезопасными против атак с расщеплением числа фотонов при потерях в канале порядка 13 дБ.

Рассматривали протоколы распределения квантовых ключей, устойчивые к атакам с расщеплением числа фотонов, вплоть до потерь в канале 40 дБ. Есть два возможности для этого: 1) использовать неортогональность квантовых состояний по-другому, как в представленном протоколе с четырьмя состояниями, или 2) включить сильный опорный импульс, который должен быть всегда обнаружен Бобом. Обе возможности кажутся достижимыми с помощью современной технологии. В первом случае уже существующие реализации протокола BB84 обеспечивают экспериментальную демонстрацию защиты квантового ключа от атак с расщеплением числа фотонов, когда применяется альтернативный процесс отсеивания. Вторая возможность показывает связь между схемами распределения квантовых ключей с дискретными и непрерывными переменными, которые заслуживают дальнейшего изучения.

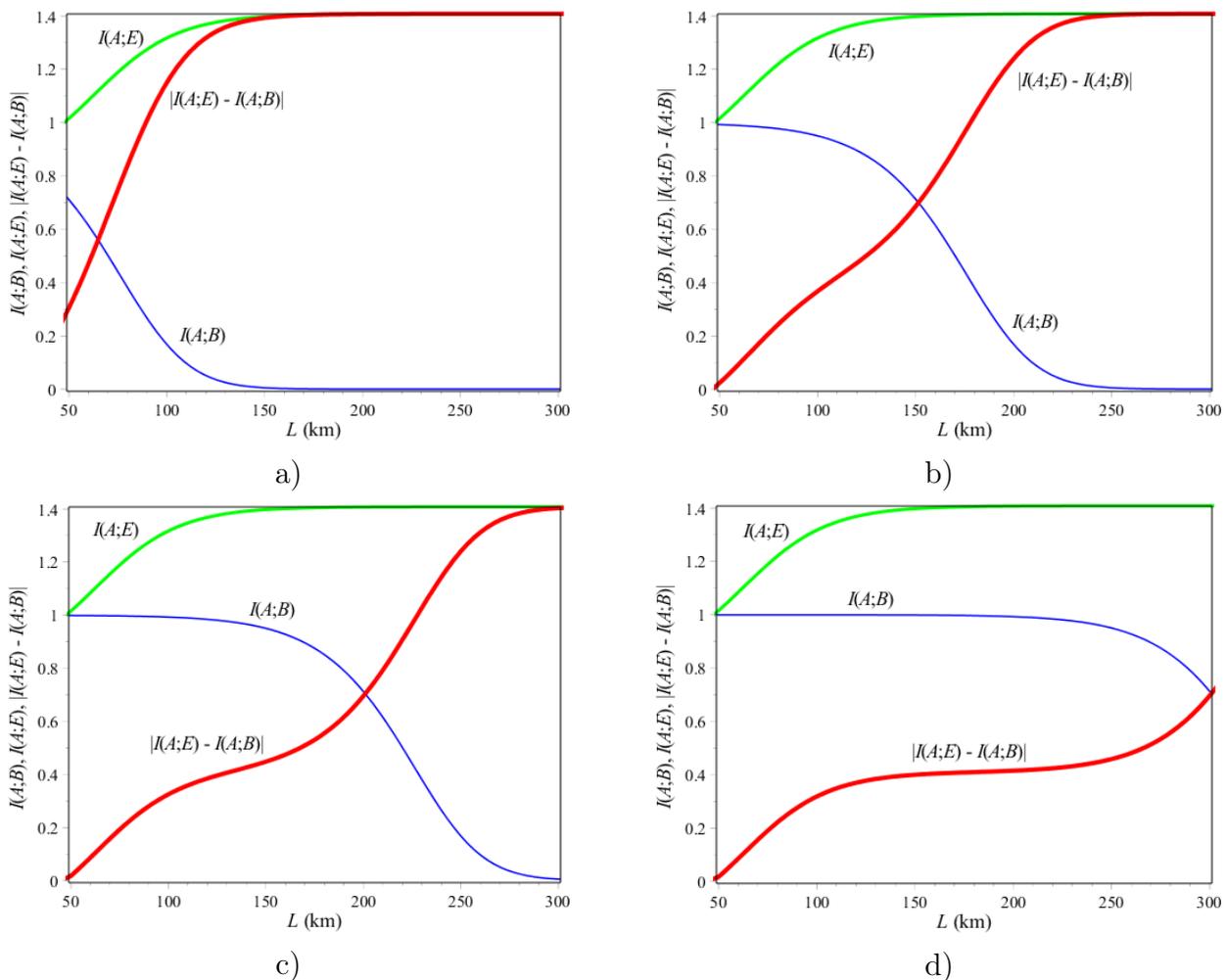


Рис. 13. Зависимости  $I(A;B)$ ,  $I(A;E)$ ,  $I(A;B) - I(A;E)$  от длины линии связи  $L$ . Вероятности темновых отсчётов равны а)  $p_{dark} = 0.85 \cdot 10^{-5}$ , б)  $p_{dark} = 0.85 \cdot 10^{-7}$ , в)  $p_{dark} = 0.85 \cdot 10^{-8}$ , г)  $p_{dark} = 0.85 \cdot 10^{-10}$ . Квантовая эффективность фотодетекторов и среднее число фотонов в когерентном состоянии одинаковы для всех кривых и равны соответственно  $\eta = 0.1$ ,  $\mu = 0.2$ . Угол между состояниями  $\alpha = \pi/8$ .

Рассчитаны характеристики квантового канала связи. Вычисления произведены при различных сценариях. При помощи управления переходами между квантовыми состояниями системы предложен протокол квантовой криптографии.

Наконец, очень важно, что в ходе исследований задач квантовых вычислений подвергаются новому анализу и экспериментальной проверке основные проблемы квантовой физики: проблемы локальности, реальности, дополнителности, скрытых параметров, коллапса волновой функции.

По результатам работы можно сформулировать следующие выводы:

1. проведённый анализ научной литературы по состоянию работ по квантовой криптографии показал существование возрастающих потребностей в создании дистанционных курсов по квантовой криптографии для различных уровней образования,
2. разработанная теория квантовой криптографии позволила создать и наполнить структуру лекционного курса по физическим основам квантовой криптографии,
3. разработан курс по физическим основам квантовой криптографии в системе управления обучением MOODLE, который готов к использованию в учебном процессе в качестве дистанционного курса или курса по смешанной технологии обучения.

Показано, что эффективность кодирования квантовой информации можно увеличить, если использовать эффект квантового сжатия фотонных состояний. Произведена оценка вероятности подслушивания при передаче квантовой информации в оптической сети между взаимодействующими атомами, помещёнными в общее поле фотонов. Показана принципиальная возможность создания квантового алгоритма переноса квантовой информации, защищённого от возможности прослушивания.

Использование дистанционного курса по физическим основам квантовой криптографии, созданного в системе управления обучением MOODLE, способствует интенсификации учебного процесса и более осмысленному изучению материала, приобретению навыков самоорганизации и превращению систематических знаний в системные, помогает развитию познавательной деятельности студентов и интереса к предмету.

Созданный в работе дистанционный курс по физическим основам квантовой криптографии, созданный в системе управления обучением MOODLE на образовательном портале университета, позволяет эффективно планировать, организовывать и проводить обучение по квантовой криптографии в педагогическом университете.

### Список использованных источников

1. Quantum cryptography / N. Gisin [et al.] // *Reviews of Modern Physics*. — 2002. — mar. — Vol. 74, no. 1. — P. 145–195. — URL: <https://doi.org/10.1103/revmodphys.74.145>.
2. Wootters W. K., Zurek W. H. A single quantum cannot be cloned // *Nature*. — 1982. — oct. — Vol. 299, no. 5886. — P. 802–803. — URL: <https://doi.org/10.1038/299802a0>.
3. Ekert A. K. Quantum cryptography based on Bell's theorem // *Physical Review Letters*. — 1991. — aug. — Vol. 67, no. 6. — P. 661–663. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.67.661>.
4. Elliott Ch. Building the quantum network // *New Journal of Physics*. — 2002. — jul. — Vol. 4. — P. 46–46. — URL: <https://doi.org/10.1088/1367-2630/4/1/346>.
5. Wang Y. Unconditional Security of Cryptosystem: A Review and Outlook // *Trends in Applied Sciences Research*. — 2011. — jun. — Vol. 6, no. 6. — P. 554–562. — URL: <https://doi.org/10.3923/tasr.2011.554.562>.
6. Security of Quantum Key Distribution Using d-Level Systems / N. J. Cerf [et al.] // *Physical Review Letters*. — 2002. — mar. — Vol. 88, no. 12. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.88.127902>.
7. Molotkov S. N. What is a quantum cryptography protocol that ensures the maximum distance in the case of a strictly single-photon source? // *JETP Letters*. — 2015. — oct. — Vol. 102, no. 7. — P. 473–477. — URL: <https://doi.org/10.1134/s0021364015190108>.
8. Molotkov S. N. On the stability of fiber-optic quantum cryptography at arbitrary losses in a communication channel: Exclusion of unambiguous measurements // *JETP Letters*. — 2014. — nov. — Vol. 100, no. 6. — P. 413–419. — URL: <https://doi.org/10.1134/s0021364014180076>.
9. Molotkov S. N. Relativistic quantum cryptography on “Arrested” photons // *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*. — 2002. — jul. — Vol. 76, no. 1. — P. 71–76. — URL: <https://doi.org/10.1134/1.1507231>.

10. Molotkov S. N., Potapova T. A. Wavefunctions of a prolate spheroid and multiplexing in relativistic quantum cryptography on orthogonal states // JETP Letters. — 2015. — jan. — Vol. 100, no. 9. — P. 596–603. — URL: <https://doi.org/10.1134/s0021364014210115>.
11. Molotkov S. N. On the quantum-mechanical bound on the loss of information through side channels in quantum cryptography // JETP Letters. — 2013. — jul. — Vol. 97, no. 10. — P. 604–610. — URL: <https://doi.org/10.1134/s002136401310007x>.
12. Molotkov S. N. Relativistic quantum cryptography for open space without clock synchronization on the receiver and transmitter sides // JETP Letters. — 2011. — nov. — Vol. 94, no. 6. — P. 469–476. — URL: <https://doi.org/10.1134/s0021364011180093>.
13. Molotkov S. N., Nazin S. S. Quantum cryptography based on homodyne detection (vacuum-state cryptosystem) // Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters. — 1997. — jul. — Vol. 66, no. 1. — P. 68–72. — URL: <https://doi.org/10.1134/1.567485>.
14. Molotkov S. N. On the ultimate capabilities of the quantum key distribution with the control over the statistics of a non-single-photon source // JETP Letters. — 2008. — jul. — Vol. 87, no. 10. — P. 586–591. — URL: <https://doi.org/10.1134/s0021364008100159>.
15. Bennett Ch. H., Brassard G. Quantum public key distribution reinvented // ACM SIGACT News. — 1987. — jul. — Vol. 18, no. 4. — P. 51–53. — URL: <https://doi.org/10.1145/36068.36070>.
16. Plesch M., Pawłowski M., Pivoluska M. 1-out-of-2 oblivious transfer using a flawed bit-string quantum protocol // Physical Review A. — 2017. — apr. — Vol. 95, no. 4. — URL: <https://doi.org/10.1103/physreva.95.042324>.
17. Kronberg D. A., Molotkov S. N. Quantum key distribution in a single-photon regime with nonorthogonal basis states // JETP Letters. — 2009. — jun. — Vol. 89, no. 7. — P. 370–376. — URL: <https://doi.org/10.1134/s0021364009070133>.
18. Kronberg D. A., Molotkov S. N. Enhancement of the robustness of phase-time quantum cryptography by block error correction // JETP Letters. — 2010. — oct. — Vol. 92, no. 7. — P. 490–495. — URL: <https://doi.org/10.1134/s0021364010190124>.

**Сведения об авторах:**

**Яна Сергеевна Замлелова** — магистрант факультета физико-математического и технологического образования ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», Ульяновск, Россия.

E-mail: zamlelowa1998@mail.ru

ORCID iD  0000-0002-6761-5478

Web of Science ResearcherID  ABA-5168-2020

# Development of elements of a distance course on the physical foundations of quantum cryptography

Ya. S. Zamlelova 

*Ulyanovsk State Pedagogical University, 432071, Ulyanovsk, Russia*

Submitted March 18, 2021

Resubmitted April 14, 2021

Published June 12, 2021

---

**Abstract.** The description of the development of elements of an online course on the physical foundations of quantum cryptography using the MOODLE toolkit is made. An online course on elementary physics, created using the MOODLE toolkit, can be used to inform students' blended learning when studying the physical foundations of quantum cryptography, as well as to visualize the process of learning the physical foundations of quantum cryptography. The use of course control elements on the physical foundations of quantum cryptography will make it possible to systematize the control of theoretical knowledge on the physical foundations of quantum cryptography.

**Keywords:** course, quantum cryptography, physical foundations of quantum cryptography, pedagogical education, informatization of education, university educational process, distance learning methods

PACS: 03.67.Dd

---

## References

1. Plesch M., Pawłowski M., Pivoluska M. 1-out-of-2 oblivious transfer using a flawed bit-string quantum protocol // *Physical Review A*. — 2017. — apr. — Vol. 95, no. 4. — URL: <https://doi.org/10.1103/physreva.95.042324>.
2. Ekert A. K. Quantum cryptography based on Bell's theorem // *Physical Review Letters*. — 1991. — aug. — Vol. 67, no. 6. — P. 661–663. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.67.661>.
3. Elliott Ch. Building the quantum network // *New Journal of Physics*. — 2002. — jul. — Vol. 4. — P. 46–46. — URL: <https://doi.org/10.1088/1367-2630/4/1/346>.
4. Wang Y. Unconditional Security of Cryptosystem: A Review and Outlook // *Trends in Applied Sciences Research*. — 2011. — jun. — Vol. 6, no. 6. — P. 554–562. — URL: <https://doi.org/10.3923/tasr.2011.554.562>.
5. Quantum cryptography / N. Gisin [et al.] // *Reviews of Modern Physics*. — 2002. — mar. — Vol. 74, no. 1. — P. 145–195. — URL: <https://doi.org/10.1103/revmodphys.74.145>.
6. Wootters W. K., Zurek W. H. A single quantum cannot be cloned // *Nature*. — 1982. — oct. — Vol. 299, no. 5886. — P. 802–803. — URL: <https://doi.org/10.1038/299802a0>.
7. Security of Quantum Key Distribution Using d-Level Systems / N. J. Cerf [et al.] // *Physical Review Letters*. — 2002. — mar. — Vol. 88, no. 12. — URL: <https://doi.org/10.1103/physrevlett.88.127902>.

8. Bennett Ch. H., Brassard G. Quantum public key distribution reinvented // ACM SIGACT News. — 1987. — jul. — Vol. 18, no. 4. — P. 51–53. — URL: <https://doi.org/10.1145/36068.36070>.
9. Molotkov S. N. On the ultimate capabilities of the quantum key distribution with the control over the statistics of a non-single-photon source // JETP Letters. — 2008. — jul. — Vol. 87, no. 10. — P. 586–591. — URL: <https://doi.org/10.1134/s0021364008100159>.
10. Kronberg D. A., Molotkov S. N. Quantum key distribution in a single-photon regime with nonorthogonal basis states // JETP Letters. — 2009. — jun. — Vol. 89, no. 7. — P. 370–376. — URL: <https://doi.org/10.1134/s0021364009070133>.
11. Kronberg D. A., Molotkov S. N. Enhancement of the robustness of phase-time quantum cryptography by block error correction // JETP Letters. — 2010. — oct. — Vol. 92, no. 7. — P. 490–495. — URL: <https://doi.org/10.1134/s0021364010190124>.
12. Molotkov S. N. What is a quantum cryptography protocol that ensures the maximum distance in the case of a strictly single-photon source? // JETP Letters. — 2015. — oct. — Vol. 102, no. 7. — P. 473–477. — URL: <https://doi.org/10.1134/s0021364015190108>.
13. Molotkov S. N. On the stability of fiber-optic quantum cryptography at arbitrary losses in a communication channel: Exclusion of unambiguous measurements // JETP Letters. — 2014. — nov. — Vol. 100, no. 6. — P. 413–419. — URL: <https://doi.org/10.1134/s0021364014180076>.
14. Molotkov S. N. Relativistic quantum cryptography on “Arrested” photons // Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters. — 2002. — jul. — Vol. 76, no. 1. — P. 71–76. — URL: <https://doi.org/10.1134/1.1507231>.
15. Molotkov S. N., Potapova T. A. Wavefunctions of a prolate spheroid and multiplexing in relativistic quantum cryptography on orthogonal states // JETP Letters. — 2015. — jan. — Vol. 100, no. 9. — P. 596–603. — URL: <https://doi.org/10.1134/s0021364014210115>.
16. Molotkov S. N. Relativistic quantum cryptography for open space without clock synchronization on the receiver and transmitter sides // JETP Letters. — 2011. — nov. — Vol. 94, no. 6. — P. 469–476. — URL: <https://doi.org/10.1134/s0021364011180093>.
17. Molotkov S. N. On the quantum-mechanical bound on the loss of information through side channels in quantum cryptography // JETP Letters. — 2013. — jul. — Vol. 97, no. 10. — P. 604–610. — URL: <https://doi.org/10.1134/s002136401310007x>.
18. Molotkov S. N., Nazin S. S. Quantum cryptography based on homodyne detection (vacuum-state cryptosystem) // Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters. — 1997. — jul. — Vol. 66, no. 1. — P. 68–72. — URL: <https://doi.org/10.1134/1.567485>.

#### Information about authors:

**Yana Sergeevna Zamlelova** — Master’s student of the Faculty of Physics, Mathematics and Technological Education of the Ulyanovsk State Pedagogical University, Ulyanovsk, Russia.

E-mail: [zamlelova1998@mail.ru](mailto:zamlelova1998@mail.ru)

ORCID iD  0000-0002-6761-5478

Web of Science ResearcherID  ABA-5168-2020

## Авторский указатель

Алтунин, К. К., 47, 75, 101  
Галоватюк, Т. В., 21  
Гришанина, Е. А., 1  
Замлелова, Я. С., 155

Купреянова, Е. А., 75  
Кучерова, Ю. А., 101  
Сорокина, Е. О., 137  
Шарнина, И. А., 47



