

ISSN 2712-8326



НАУКА ONLINE
SCIENCE ONLINE

Сетевое издание
№ 1 (34) | 2026

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

НАУКА ONLINE, № 1 (34), 2026.

Сетевое издание «НАУКА ONLINE» зарегистрировано как средство массовой информации в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (регистрационный номер: серия Эл № ФС77-75253; дата принятия решения: 01 апреля 2019 г.).

ISSN 2712-8326

Выходит 4 раза в год.

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

Адрес учредителя: 432071, Ульяновская область, город Ульяновск, площадь Ленина, дом 4/5.

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

Адрес издателя: 432071, Ульяновская область, город Ульяновск, площадь Ленина, дом 4/5.

Главный редактор: К. К. Алтунин.

Адрес редакции: Россия, 432071, Ульяновская область, город Ульяновск, площадь Ленина, дом 4/5.

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

E-mail: nauka_online@ulspu.ru

Science online, issue 1 (34), 2026.

The online publication "Science Online" is registered as a mass media outlet with the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media (registration number: series El No. FS77-75253; date of decision: April 1, 2019).

ISSN 2712-8326

Published 4 times a year.

Founder: Ulyanovsk State Pedagogical University.

The address of the founder is 432071, Ulyanovsk region, Ulyanovsk city, Lenin square, 4/5.

Publisher: Ulyanovsk State Pedagogical University.

The address of the publisher is 432071, Ulyanovsk region, Ulyanovsk city, Lenin square, 4/5.

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

Editorial office address: Russia, 432071, Ulyanovsk region, Ulyanovsk city, 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, доцент кафедры физики и технических дисциплин ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», город Ульяновск, Российская Федерация.

Веселовская Юлия Александровна, кандидат педагогических наук, доцент, доцент кафедры методик математического и информационно-технологического образования, декан факультета физико-математического и технологического образования ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», город Ульяновск, Российская Федерация.

Вилков Евгений Александрович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории исследований физических явлений на поверхности и границах раздела твердых тел, Институт радиотехники и электроники имени В. А. Котельникова РАН, фрязинский филиал, город Фрязино, Московская область, Российская Федерация.

Громова Екатерина Михайловна, кандидат педагогических наук, доцент, доцент кафедры методик математического и информационно-технологического образования ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», город Ульяновск, Российская Федерация.

Демин Максим Викторович, кандидат физико-математических наук, проректор по научной работе ФГАОУ ВО «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта», город Калининград, Российская Федерация.

Идиатуллин Тимур Тофикович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры SMART-технологии ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», город Москва, Российская Федерация.

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

Капитанчук Василий Вячеславович, кандидат технических наук, доцент кафедры организации аэропортовой деятельности и информационных технологий ФГБОУ ВО «Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б. П. Бугаева», город Ульяновск, Российская Федерация.

Каренин Алексей Александрович, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры информатики ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», город Ульяновск, Российская Федерация.

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

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

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

Фомин Игорь Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор факультета фундаментальных наук ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», город Москва, Российская Федерация.

Фролов Даниил Анатольевич, кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры биологии и химии ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», город Ульяновск, Российская Федерация.

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

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

Шалин Александр Сергеевич, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО», город Санкт-Петербург, Российская Федерация.

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

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», город Ульяновск, Российская Федерация.

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, Ulyanovsk, Russian Federation.

Yulia Aleksandrovna Veselovskaya, Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Dean of the Faculty of Physics, Mathematics and Technological Education of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ulyanovsk State Pedagogical University”, Ulyanovsk, Russian Federation.

Evgeniy Aleksandrovich Vilkov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, leading researcher at the Laboratory for Research of Physical Phenomena on the Surface and Interfaces of Solids, Institute of Radio Engineering and Electronics named after V. A. Kotelnikov RAS, Fryazino branch, Fryazino city, Moscow region, Russian Federation.

Ekaterina Mikhailovna Gromova, PhD, Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Associate Professor the Department of Methods of Mathematical and Information Technology Education, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ulyanovsk State Pedagogical University”, Ulyanovsk, Russian Federation.

Maxim Viktorovich Demin, PhD, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Vice-Rector for Scientific Work of the Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education “Immanuel Kant Baltic Federal University”, Kaliningrad, Russian Federation.

Timur Tofikovich Idiatullov, PhD, Candidate of physical and mathematical sciences, associate professor of the department of SMART technologies of the Moscow Polytechnic University, Moscow, Russian Federation.

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”, Republic of Bashkortostan, Russian Federation.

Vasily Vyacheslavovich Kapitanchuk, PhD, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Organization of Airport Operations and Information Technologies of the Ulyanovsk Institute of Civil Aviation named after Chief Marshal of Aviation B. P. Bugaev, Ulyanovsk, Russian Federation.

Aleksey Aleksandrovich Karenin, PhD, Candidate of physical and mathematical sciences, associate professor, associate professor of the Department of Informatics, Ulyanovsk State Pedagogical University, Ulyanovsk, Russian Federation.

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.

Svetlana Aleksandrovna Pyrova, PhD, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Biology and Chemistry of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ulyanovsk State Pedagogical University”, Ulyanovsk, Russian Federation.

Vladimir Nikolaevich Fedorov, PhD, Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Geography and Ecology of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ulyanovsk State Pedagogical University”, Ulyanovsk, Russian Federation.

Igor Vladimirovich Fomin, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Faculty of Basic Sciences of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Moscow State Technical University named after N. E. Bauman (National Research University)”, Moscow, Russian Federation.

Daniil Anatolyevich Frolov, PhD, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor of the Department of Biology and Chemistry of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ulyanovsk State Pedagogical University”, Ulyanovsk, Russian Federation.

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

Sergey Viktorovich Chervon, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of the Department of Physics and Technical Disciplines of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ulyanovsk State Pedagogical University”, Ulyanovsk, Russian Federation.

Alexander Sergeevich Shalin, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, senior researcher at the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “National Research University ITMO”, St. Petersburg, Russian Federation.

Viktor Vyacheslavovich Shishkarev, PhD, Candidate of technical sciences, associate professor, head of the department of the department of physics and technical disciplines of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ulyanovsk State Pedagogical University”, Ulyanovsk, Russian Federation.

Valery Gennadievich Shubovich, Doctor of Pedagogical Sciences, Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Informatics, Professor of the Department of Informatics of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ulyanovsk State Pedagogical University”, Ulyanovsk, Russian Federation.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1	Компьютерные науки и информатика	1
1.1	Теоретическая информатика	1
	<i>А. А. Родионова.</i> Проектирование дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования	1
2	Физические науки	22
2.1	Оптика	22
	<i>К. К. Алтунин.</i> Исследование закона Бугера–Ламберта–Бера и соотношения Клаузиуса–Моссотти–Лоренца–Лоренца в композитных средах из метаматериалов с отрицательным показателем преломления	22
2.2	Теоретическая физика	37
	<i>В. М. Тимченко.</i> Эффект Холла как гальваномагнитный эффект в мезоскопических системах	37
	<i>А. Ш. Джаббарова.</i> Исследование физических процессов распространения звуковых волн в микшерных системах	48
3	Технические науки	58
3.1	Фотоника	58
	<i>Е. А. Илюшкина.</i> Исследование физических свойств материалов нейроиконики	58
4	Науки об образовании	66
4.1	Теория и методика обучения и воспитания	66
	<i>Э. А. Юсифова.</i> Исследование методологии педагогического проектирования дистанционных курсов	66
	Авторский указатель	82

CONTENTS

1	Computer science and information science	1
1.1	Theoretical computer science	1
	Designing a distance learning course on modern didactic systems for higher education	
	<i>A. A. Rodionova</i>	1
2	Physical sciences	22
2.1	Optics	22
	Investigation of the Beer-Lambert law and the Clausius-Mossotti-Lorentz-Lorentz relationship in composite media made of negative-refractive-index metamaterials	
	<i>K. K. Altunin</i>	22
2.2	Theoretical physics	37
	The Hall effect as a galvanomagnetic effect in mesoscopic systems	
	<i>V. M. Timchenko</i>	37
	Investigation of physical processes of sound wave propagation in mixing systems	
	<i>A. Sh. Dzhabbarova</i>	48
3	Technical science	58
3.1	Photonics	58
	Investigation of the physical properties of neuroiconic materials	
	<i>E. A. Ilyushkina</i>	58
4	Educational sciences	66
4.1	Theory and methodology of training and education	66
	Investigation of the methodology of pedagogical design of distance courses	
	<i>E. A. Yusifova</i>	66
	Author's index	84

Секция 1

Компьютерные науки и информатика

1.1 Теоретическая информатика

Научная статья

УДК 004.77

ББК 22.18

ГРНТИ 20.53.23

ВАК 1.2.3.

RACS 01.40.Di

OCIS 000.2060

MSC 97U70

Проектирование дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования

А. А. Родионова  ¹

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

Поступила в редакцию 17 февраля 2026 года

После переработки 20 февраля 2026 года

Опубликована 31 марта 2026 года

Аннотация. Целью исследования является разработка дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования. Мотивация исследования обусловлена необходимостью адаптации образовательных процессов к цифровой среде. В работе используются методы анализа, синтеза и экспертной оценки. Гипотеза научного исследования состоит в том, что разработанный дистанционный курс повысит эффективность обучения современным дидактическим системам в высшем образовании. Результаты исследования включают создание структуры курса, подбор методических материалов. Практическая значимость исследования заключается в возможности применения разработанного курса в образовательных учреждениях.

Ключевые слова: дидактическая система, курс, дистанционный курс, высшее образование, цифровая среда

¹E-mail: rod_nastay_0000@mail.ru

Введение

Современные дидактические системы в высшем образовании переходят от обучения, ориентированного на преподавателя, к обучению, ориентированному на учащегося и использующему цифровые технологии. Ключевые компоненты современных дидактических систем включают интеграцию искусственного интеллекта, смешанное обучение, симуляции и персонализированные образовательные траектории, разработанные для развития критического мышления, креативности и цифровой грамотности. Современные дидактические системы делают акцент на активном обучении, мобильном доступе (мобильное обучение) и непрерывной оценке, смещая роль преподавателя на роль наставника.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью внедрения современных дидактических систем в высшее образование для повышения качества обучения.

Целью работы является разработка дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования. Задачи исследования включают в себя обзор литературы по современным дидактическим системам, разработку тематической структуры дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования, разработку элементов дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования в системе управления обучением MOODLE.

Объектом исследования является процесс обучения в высшем образовании. Предметом исследования является дистанционный курс по современным дидактическим системам.

Гипотеза научного исследования состоит в том, что разработанный дистанционный курс повысит эффективность обучения современным дидактическим системам в высшем образовании.

В качестве методов исследования используются анализ научной литературы, синтез методических материалов. В качестве материалы исследования используются научные публикации по дидактическим системами анализу опыта ведущих образовательных учреждений.

Научная новизна исследования состоит в разработке структуры курса, адаптированной к цифровой среде университетов.

Теоретическая значимость исследования заключается в том, что исследование способствует развитию теории дистанционного обучения и внедрению современных дидактических систем в образовательный процесс. Практическая значимость исследования заключается в том, что разработанный курс может быть использован в образовательных учреждениях для повышения качества обучения.

Обзор

В статье @auxrussian@auxenglish[1] представлена подробная информация о разработке образовательной политики и стратегий, внедрении нового механизма отчетности в системе образования, реализации образовательных стратегий устойчивого развития, а также проектах международных организаций, подготовке стратегических документов, отчётов, проектов реформ на основе результатов анализов и исследований. В настоящее время концепция «цифровой культуры» становится предметом научно-методологических размышлений. Проблема цифровизации цивилизации и её глобальных последствий остаётся актуальной в контексте модернизации образовательных процессов. Цифровая культура в высшем образовании создаёт необходимость обновления принципов и методов работы, ориентированных на специалиста цифровой эпохи будущего. Материальным уровнем цифровой культуры – объектом её анализа – являются непосредственно цифровые устройства во всех существующих разновидностях.

Цифровая культура — это особая форма человеческого существования, основанная на создании цифровых объектов и явлений, которые вносят изменения в поведенческие модели традиционных социокультурных коммуникаций; она также включает цифровую грамотность как один из ключевых элементов поддержки определённых ценностей психически сформированной личности, а также создания успешной адаптации человека к цифровой среде [1].

В статье [2] описана разработка и применение в образовательном процессе профессиональной школы современных цифровых и сетевых технологий, приводящие к необходимости развития общей теории и дидактики профессионального образования с учётом анализа инновационного опыта деятельности ведущих университетов в условиях цифровой трансформации. В статье [2] продолжена разработка основ теории дидактических систем технического образования в условиях цифровой и сетевой трансформации, начатая в первой части работы. В статье [2] обсуждается информационный подход к развитию общей теории и дидактики образования, начата разработка основ модельной дидактической системы высшего образования. В статье [2] формулируются основные методологические положения дидактических систем в высшей школе и подходы к разработке модельной дидактической системы. В статье [2] рассматриваются концептуальные положения использования цифровых технологий при построении дидактических систем, а также особенности разработки дидактических систем для технического образования. В статье [2] выработаны методологические основы построения дидактических систем в высшем техническом образовании в условиях цифровой и сетевой трансформации, сформулирован ряд методологических положений теории цифровой и сетевой трансформации образования, начато создание модельной дидактической системы.

В системе высшего образования дистанционное обучение посредством электронных курсов становится наиболее актуальным и востребованным методом обучения за последнее десятилетие. В статье [3] оценивается качество внедрения принципов дистанционного обучения в университетский учебный процесс. В статье [3] описано, что в эксперименте приняли участие 1250 студентов Казанского федерального университета. Опрос помог выявить основные барьеры на пути эффективного внедрения современных технологий дистанционного обучения в университетский учебный процесс: неготовность преподавателей и родителей, недостаток необходимых навыков использования компьютерных онлайн-систем обучения, невозможность взаимодействия с преподавательским составом, нехватка онлайн-консультантов. Кроме того, в статье [3] исследуются внутренние проблемы: ограниченные ресурсы, неравномерное распределение маркетинговых преимуществ, неадекватная административная структура и отсутствие инновационных физических объектов. Работа [3] позволяет выявить указанные проблемы путем поэтапного внедрения модели дистанционного обучения, подходящей для любого университета, независимо от его специализации.

Развитие и эволюция цифровых технологий могут способствовать трансформации образовательного сектора, позволяя интегрировать инновационные подходы к обучению. Типичными примерами таких подходов являются искусственный интеллект, дополненная и виртуальная реальность, адаптивное обучение и онлайн-образовательные среды. В статье [4] рассматриваются современные цифровые образовательные методы, уделяя особое внимание преимуществам, проблемам и будущим перспективам современных технологий в образовании. В статье [4] систематический обзор литературы проводился исключительно на основе базы данных Scopus. В статье [4] изучили 948 статей, опубликованных с 1968 по 2025 год. Кроме того, в статье [4] с помощью программы VOSviewer (версия 1.6.20) был проведён анализ результатов, выявивший и выделивший различные тенденции и ключевые тематические области. Однако, несмотря на то, что цифровые образовательные методы обеспечивают большую интерактивность, персона-

лизацию и гибкость в обучении, они также сталкиваются со значительными проблемами, среди которых цифровое неравенство, защита конфиденциальности и подготовка учителей.

В настоящее время передовые технологии способствуют развитию образовательного процесса, что предполагает поиск новых подходов к предоставлению информации. Цель исследования в статье [5] заключается в том, чтобы определить эффективность использования современных технологий для повышения эффективности обучения в высших учебных заведениях. Достижение указанной цели стало возможным благодаря расчету коэффициента вариации полученного уровня знаний, коэффициента Стьюдента, а также метода прямой стандартизации. В статье [5] было установлено, что наибольшим преимуществом использования современных технологий является возможность сочетания дистанционного и очного обучения. Однако недостатком является сложность определения соответствующих технологий в соответствии с программой обучения. Разработанные механизмы обеспечения учебного процесса были реализованы с помощью программного обеспечения Blackboard, CourseCraft, Trello, EdApp, Scheduler Maker. В статье [5] было установлено, что среди студентов, изучавших педагогику и методику начальной школы (группа 1), высокий уровень знаний был достигнут 71 %. Студенты группы 2, изучавшие английский язык, достигли высокого уровня с 65 % студентов. Практическое значение исследования, представленного в статье [5], заключается в улучшении процесса обучения в высших учебных заведениях за счёт использования современных технологий.

Дидактическое использование цифровых технологий в высшем образовании часто не достигает желаемого эффекта, поскольку их эффективность зависит от способа внедрения технологий. В статье [6] выполнен систематический обзор для выявления наиболее распространенные дидактические модели, используемые преподавателями высшего образования в области цифрового образования, и оценить связанные с ними преимущества и проблемы. В статье [6] после отбора было включено 19 исследований. В статье [6] преобладала модель технологического педагогического предметного знания с 10 исследованиями, за ней следовали конструктивистские модели с 2 исследованиями, в то время как семь альтернативных подходов, включая модель принятия технологий, ADDIE (анализ, проектирование, разработка, внедрение, оценка), дидактический тетраэдр и другие, были представлены по одному исследованию каждый. Применение этих дидактических моделей приносит пользу преподавателям, позволяя им адаптировать обучение к различным технологическим инструментам и потребностям студентов, поддерживать ориентированную на студента учебную среду, повышать вовлечённость и эффективность процессов оценки, способствовать рефлексивной педагогической практике и развивать междисциплинарные связи. Однако среди выявленных проблем можно отметить недостаточную институциональную поддержку, различия в цифровой компетентности, необходимость в надёжных инструментах оценки и трудности в поддержании мотивации студентов в полностью онлайн-среде. В статье [6] обнаружили, что неоднородность в определениях моделей и контекстах исследований ограничивает сопоставимость между исследованиями. Технологические педагогические знания о содержании остаются доминирующей цифровой дидактической основой, но малоизученные модели предлагают дополнительные идеи в области обучения с использованием технологий. В статье [6] рекомендуется будущим исследованиям изучить адаптации к конкретным контекстам, а также гибридные подходы.

В статье [7] описаны современные образовательные технологии, используемые для обеспечения стратегического академического лидерства. Цель исследования в статье [7] является разработка концептуальных основ цифровизации образования: достижение академического лидерства российских университетов невозможно без эффектив-

ной цифровой трансформации отечественной системы высшего образования. В статье [7] результаты исследования вносят вклад в теорию цифровой дидактики высшего образования, которая может не только формировать цифровые компетенции участников образовательного процесса, но и, в сочетании с другими педагогическими технологиями, стать перспективным направлением развития современного высшего образования. Сегодня образовательный процесс университетов требует нового понимания и развития адекватных подходов к трансформации по ряду объективных причин и глобальных тенденций: диссонанс между растущими требованиями клиентов образовательных услуг и интересами университетов; низкий уровень цифровой грамотности и цифровых навыков среди преподавателей; неэффективное использование индивидуальных резервов студентов; недостаточный уровень развития дидактики и инфраструктуры цифрового образования в университетах. В статье [7] показано, что всё это предопределяет необходимость выявления и разработки новой гибкой интерактивной цифровой образовательной системы с использованием различных интеллектуальных технологий и устройств, которая позволит не только увеличить объём образовательной информации и усилить индивидуализацию образовательного процесса, но и диверсифицировать способы интерактивного взаимодействия субъектов образовательного процесса для повышения его эффективности.

В статье [8] описываются основные педагогические технологии, используемые в высшем образовании. В статье [8] рассматриваются традиционные и инновационные педагогические технологии высшего образования. Современная педагогика представляет собой совокупность теоретических и прикладных наук об обучении, воспитании и образовании как специально организованных и целенаправленных процессах, а также о способах совершенствования этих процессов. Именно поэтому учебный процесс в высшем образовании реализуется в рамках целостной системы организационных форм, методов и технологий обучения, что позволяет сформировать компетентного специалиста. Цель статьи [8] состоит в том, чтобы исследовать современную педагогику высшего образования и педагогические технологии, принципы, методы, на которых она основана и которыми руководствуется в своей деятельности. В статье [8] доказано, что педагогические технологии включают следующие компоненты: образовательные технологии, определяющие понятия образования, образовательные системы; технологии обучения (образования, управления) — формы и методы обучения; технологии в образовании — технические средства образования; педагогическая техника, отражающая уровень педагогических навыков преподавателя. Модульное и развивающее обучение способствует формированию личности не только посредством содержания, методов, форм организации, но и за счёт активного самообразования студентов, что приводит к более высоким результатам. В настоящее время существует несколько подходов к созданию модульной системы в зависимости от географии, содержания и структурных особенностей инноваций и образовательного опыта: американская и немецкая модели, литовская модель, украинская. Разнообразие методов и форм работы с модульно-рейтинговой педагогической технологией позволяет лучше усваивать теоретический и практический материал, и поэтому в современной педагогике высшего образования эта техника занимает одно из первых мест. В статье [8] сделан вывод, что модульная технология обучения, анализа и оценки учебной деятельности студентов является важным шагом на пути к интенсификации и оптимизации образовательного процесса в высшем образовании. Модульная система образования требует от научно-педагогических работников надлежащей психолого-педагогической подготовки, реструктуризации организационно-методических аспектов образовательного процесса. Гуманитарное образование призвано обогащать интеллектуальную и духовную культуру человека как активного творца материальных и духовных ценностей.

Общество, в котором мы живем, постоянно развивается и меняется. Современное мировое образовательное пространство постоянно пополняется новым содержанием знаний, новыми квалификациями. Возникают новые сферы взаимоотношений, новые специальности, формирующие новые дисциплины. Мировое высшее образование переживает реформу. Это привело к поиску новых форм и технологий образования. Гармонизация высшего образования в соответствии с требованиями мирового пространства и стандартами, его развитие осуществляется по определенным принципам. Это, прежде всего, приоритетное внедрение инновационных достижений в образовании и науке. Известно, что именно инновационный путь развития общества может обеспечить формирование поколения людей, мыслящих и работающих по-новому. В результате основное внимание будет уделяться развитию личности, культурной и коммуникативной подготовленности, способности самостоятельно приобретать и развивать знания, формировать информационные и социальные навыки. Учитывая это, основная цель статьи [9] состоит в изучении основных аспектов инновационных педагогических технологий в системе образования.

С начала XXI века освоение социокультурной перспективы исследовательским сообществом в области физического образования представляет собой лингвистический поворот в этой сфере, указывая на многообещающий путь преодоления доминирования «индивидуальной парадигмы» как в отношении обучения студентов, так и в отношении начальной и непрерывной подготовки учителей. Этот подход рассматривает науку, научное образование и исследования как социальную деятельность человека, встроенную в более широкий социокультурный и институциональный контекст, подразумевая значительную теоретическую важность роли социального взаимодействия и контекста, в котором эти взаимодействия происходят, рассматривая их как критически важные для лучшего понимания процесса обучения, а не просто как второстепенную роль. В этой теоретической структуре язык играет фундаментальную роль как посредник человеческой деятельности, в частности, это основная система знаков, используемая человечеством. Таким образом, в статье [10] признаются истоки социокультурных перспектив в социально-исторической психологии Льва Выготского. Джеймс Вертш предлагает «премущественность» теории Выготского, подчеркивая одно из её неисследованных предположений: характеристику человеческой деятельности как деятельности, опосредованной знаками и инструментами. В этой теоретической конструкции социокультурного подхода к человеческой деятельности решающее значение приобретает философия языка Круга Михаила Бахтина. Данные дискурсивного характера (устная и письменная речь преподавателя и его учеников, учебники или официальные документы) могут быть проанализированы в исследованиях физического образования, особенно в тех, которые сосредоточены на ситуациях в классе (как правило, дидактические вмешательства). В статье [10] использован бахтинский анализ, чтобы избежать объективистской (позитивистской) позиции текста и структурно-детерминистической идеи идеологической интерпелляции, предложенной Альтюссером и поддержанной дискурсивным анализом Пеше. Чтобы внести вклад в качественную методiku исследования дискурсивных данных, в статье [10] объясняется теория Круга и переводится в возможные методологии для исследований в области физического образования. На основе этого в статье [10] предлагается «аналитическая траектория» как возможный способ интерпретации дискурсивных данных в рамках бахтинской металингвистики. Наконец, в статье [10] приводятся примеры использования этой аналитической траектории.

Взгляды университетских профессоров на природу науки играют важную роль в формировании у студентов культуры практикующих физиков. Хотя эти темы имеют давнюю традицию в американских учебных программах, они не входят в немецкие образовательные стандарты или учебные планы. Кроме того, взгляды профессоров — в

отличие от взглядов их студентов — относительно мало изучены. В статье [11] установлена возможность проверки взглядов немецких профессоров физики с помощью экономически эффективного опроса. Сначала в статье [11] спрашивается их о взглядах на природу науки, а затем о том, насколько важными они считают эти аспекты для студентов и насколько интенсивно они рассматривают их на своих занятиях по физике в университете. В статье [11] демонстрируется, что разработанный инструмент тестирования может надежно использоваться с этой демографической группой. В статье [11] результаты показывают, что профессора склонны к наивному эмпиризму, но в остальном придерживаются в основном адекватных убеждений. Изучение природы науки на университетских курсах в целом считается очень важным, что также отражается в общаемых профессорами методах преподавания. Однако в этой области есть аспекты, которые профессора считают более или менее важными.

В статье [12] изучается роль различных аспектов обучения при планировании и апробации последовательностей преподавания и обучения по поверхностным явлениям в жидкостях для старшекласников. В частности, оно направлено на выявление того, как различные подходы к моделированию — макроскопические и мезоскопические — влияют на обучение учащихся с точки зрения различных аспектов обучения, таких как концептуальное понимание, интеллектуальный рост и научные навыки мышления. В статье [12] представлены некоторые результаты, полученные в результате применения тематического анализа к качественным данным, собранным в ходе интервью и обратной связи со студентами, и позволившие выявить ключевые аспекты обучения. Систематически связывая качественные данные с аспектами обучения, тематический анализ обеспечил структурированную основу для оценки эффективности различных стратегий обучения. В статье [12] подчёркивается роль как когнитивных, так и аффективных факторов в изучении естественных наук и акцентирует внимание на важности интеграции различных подходов к моделированию для формирования всестороннего понимания сложных научных тем.

Результаты проектирования курса

Опишем основные этапы разработки дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования в системе MOODLE. Разработка дистанционного курса по современным дидактическим системам требует системного подхода, сочетающего педагогические, технологические и методические аспекты. Ниже представлены ключевые этапы, обоснованные с позиции научной методологии и практики высшего образования.

На первом этапе разработки дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования в системе управления обучением MOODLE производится анализ потребностей и целевой аудитории. Определение целей обучения и характеристик слушателей (уровень подготовки, мотивация, профессиональные задачи) необходимо для адаптации содержания и методов обучения. Анализ может включать опросы преподавателей, студентов и экспертов в области дидактики. В результате первого этапа происходит формирование портрета целевой аудитории и перечня компетенций, которые должен освоить обучающийся.

На втором этапе разработки дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования в системе управления обучением MOODLE производится формулировка целей и задач дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования. На основе анализа определяются образовательные цели (например, освоение теоретических основ дидактических систем, развитие навыков проектирования учебных процессов) и конкретные задачи (изучение моделей смешанного обучения, анализ кейсов). В результате второго этапа происходит выбор

SMART-целей (конкретные, измеримые, достижимые, релевантные, ограниченные по времени).

На третьем этапе разработки дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования в системе управления обучением MOODLE производится отбор и структурирование содержания дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования. Содержание дистанционного курса должно соответствовать современным тенденциям в дидактике (например, конструктивизм, перевёрнутое обучение, геймификация). Материалы структурируются по модулям с учетом логики усвоения знаний. В результате третьего этапа разрабатывается учебный план с темами, подтемами и распределением по неделям и модулям.

На четвёртом этапе разработки дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования в системе управления обучением MOODLE производится выбор дидактических моделей и методов. Обоснованный выбор методов (лекции, кейс-стади, проектное обучение) и моделей обеспечивает эффективность обучения. Важно сочетать теоретические и практические подходы. В результате четвёртого этапа разрабатывается методическая концепция курса с описанием форм и методов работы.

На пятом этапе разработки дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования в системе управления обучением MOODLE производится разработка учебных материалов дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования в системе управления обучением MOODLE. Материалы должны быть адаптированы для дистанционного формата: видеолекции, интерактивные презентации, тексты, тесты. Важно обеспечить мультимодальность (сочетание текста, графики, аудио-материалов, видео-материалов). В результате пятого этапа разрабатывается набор учебных ресурсов, соответствующих стандартам доступности и интерактивности.

На шестом этапе разработки дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования в системе управления обучением MOODLE производится проектирование системы оценки и обратной связи. Оценка должна быть многоуровневой (тесты, эссе, проектные работы) и формирующей (обратная связь для коррекции знаний). Использование рубрикаторов и критериев оценки повышает прозрачность. В результате шестого этапа разрабатывается система оценки с описанием критериев и инструментов (например, системы управления обучением).

На седьмом этапе разработки дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования в системе управления обучением MOODLE производится техническая реализация курса. Выбор платформы (MOODLE, Stepik) и интеграция инструментов (форумы, вебинары, чат-боты) должны обеспечивать удобство и интерактивность. Важно учитывать технические ограничения пользователей. В результате седьмого этапа разрабатывается готовая учебная среда с загруженными материалами и настроенными инструментами.

На восьмом этапе разработки дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования в системе управления обучением MOODLE производится пилотирование и тестирование. Проведение пилотного запуска с ограниченной группой слушателей позволяет выявить слабые места (непонятные формулировки, технические сбои) и скорректировать курс. В результате восьмого этапа формируется отчёт о тестировании с рекомендациями по улучшению курса.

На девятом этапе разработки дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования в системе управления обучением MOODLE производится внедрение и сопровождение курса. После запуска курса необходим мониторинг активности студентов, оперативная техническая поддержка и обновление материалов

(например, добавление актуальных кейсов). В результате девятого этапа формируется стабильно функционирующий курс с механизмами обратной связи.

На десятом этапе разработки дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования в системе управления обучением MOODLE производится оценка эффективности и доработка курса. Анализ результатов обучения (успеваемость, отзывы) и сравнение с поставленными целями позволяет оценить эффективность курса. На основе данных вносятся коррективы. В результате десятого этапа формируется отчёт об эффективности и план доработок для следующих итераций.

Общая трудоёмкость курса составляет четыре зачётные единицы. Дистанционный курс по современным дидактическим системам для высшего образования содержит двенадцать тем.

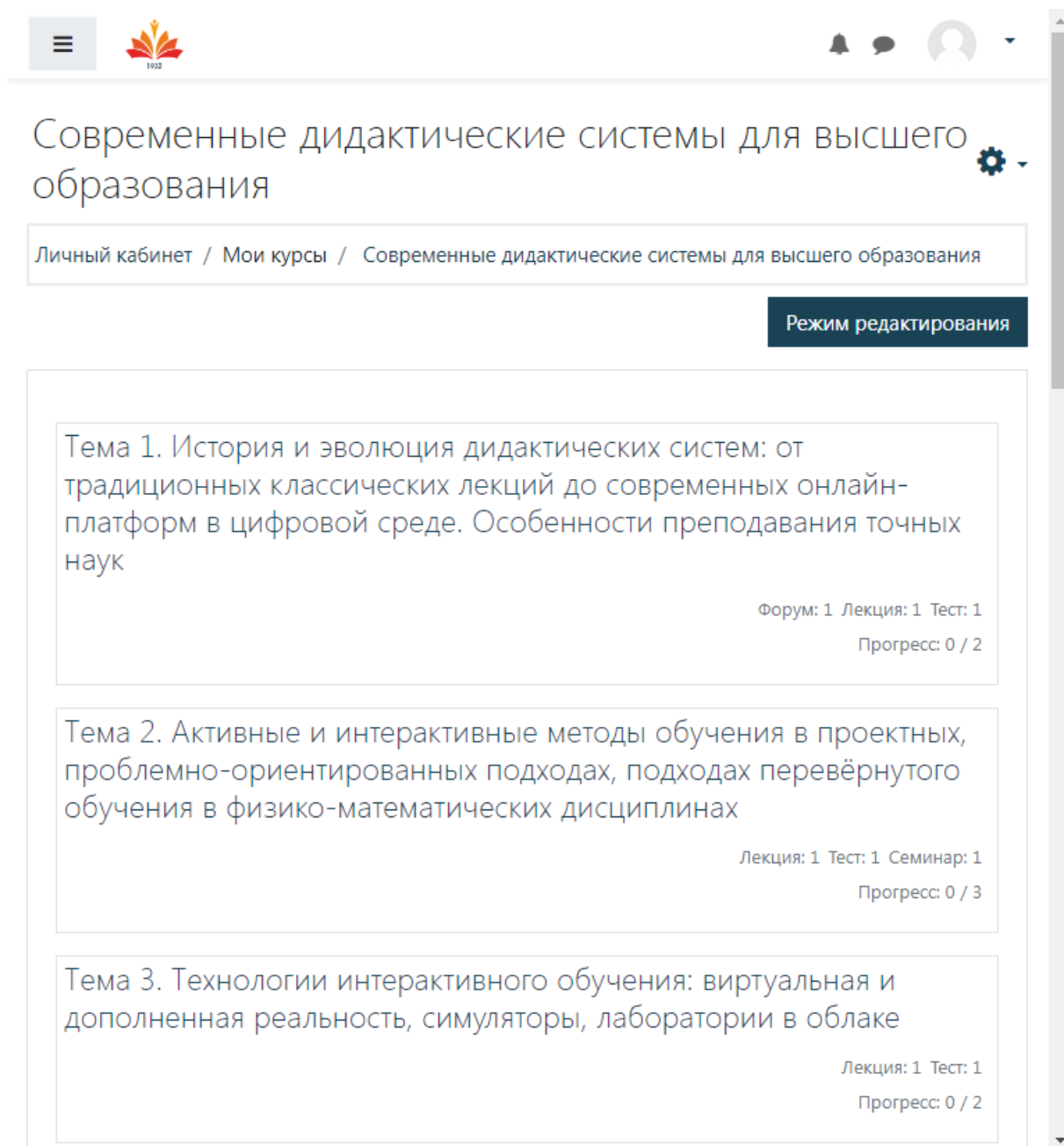


Рис. 1. Тематические модули первой зачётной единицы дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 1 приведено изображение страницы тематических модулей первой зачётной единицы дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования в системе управления обучением MOODLE.

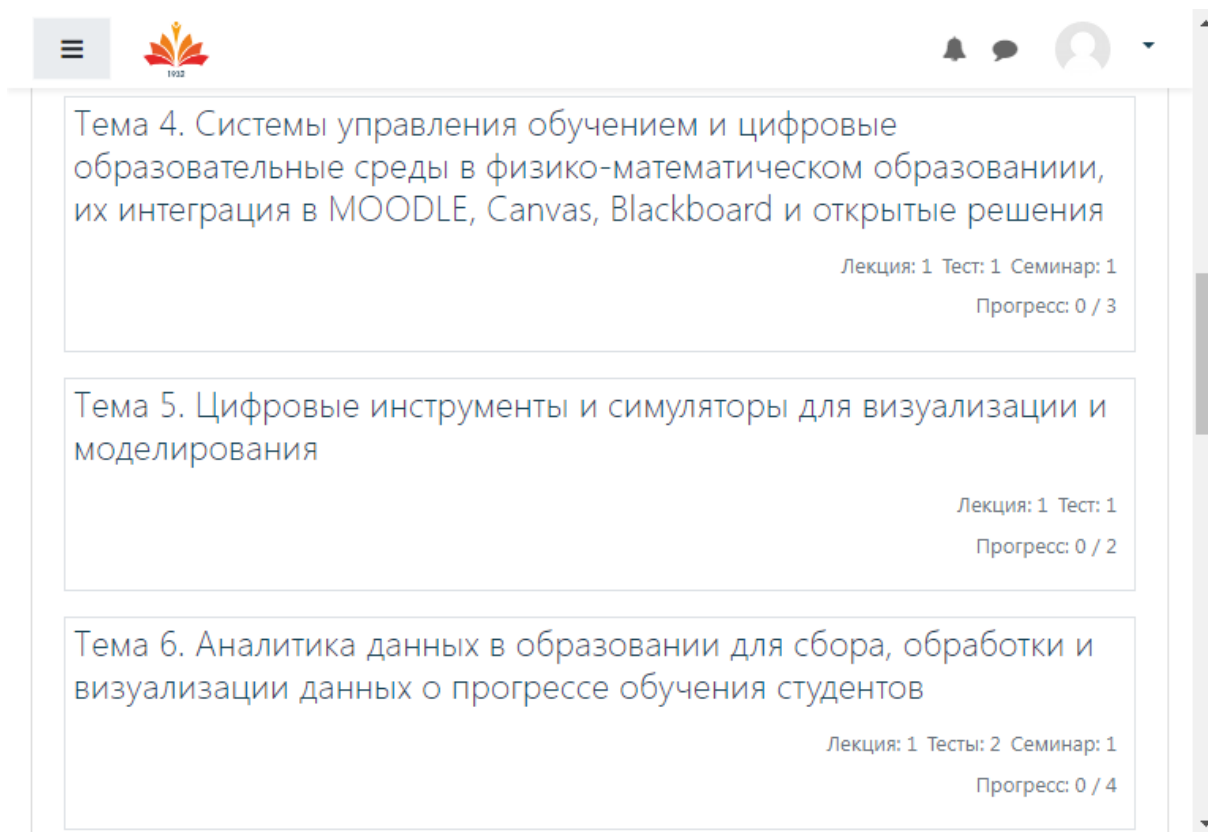


Рис. 2. Тематические модули второй зачётной единицы дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 2 приведено изображение страницы тематических модулей второй зачётной единицы дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 3 приведено изображение страницы тематических модулей третьей зачётной единицы дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 4 приведено изображение страницы тематических модулей четвёртой зачётной единицы дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 5 приведено изображение страницы с элементами первой темы дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования в системе управления обучением MOODLE

На рис. 6 приведено изображение страницы с элементами второй темы дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 7 приведено изображение страницы с элементами третьей темы дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования в системе управления обучением MOODLE

На рис. 8 приведено изображение страницы с элементами четвёртой темы дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования в системе управления обучением MOODLE.

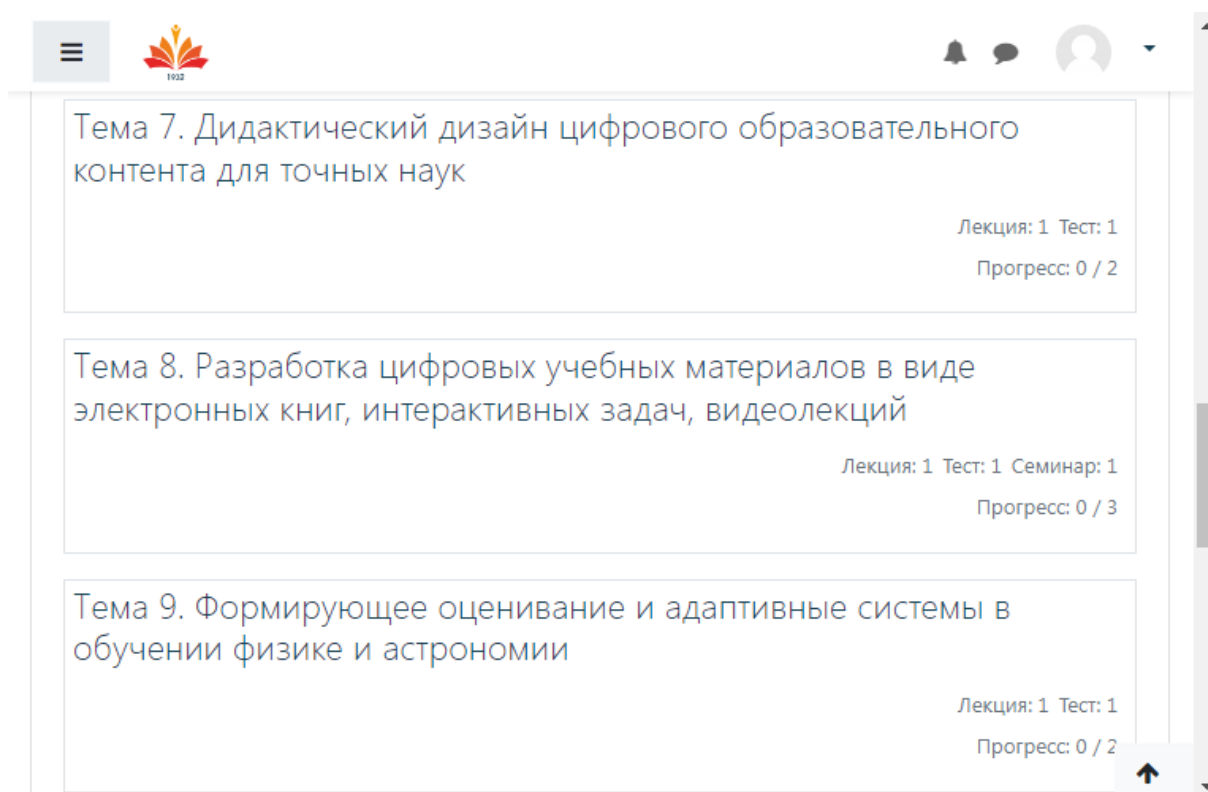


Рис. 3. Тематические модули третьей зачётной единицы дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 9 приведено изображение страницы с элементами пятой темы дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 10 приведено изображение страницы с элементами шестой темы дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 11 приведено изображение страницы с элементами седьмой темы дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 12 приведено изображение страницы с элементами восьмой темы дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 13 приведено изображение страницы с элементами девятой темы дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 14 приведено изображение страницы с элементами десятой темы дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 15 приведено изображение страницы с элементами одиннадцатой темы дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 16 приведено изображение страницы с элементами двенадцатой темы дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования в системе управления обучением MOODLE.

Первая тема дистанционного курса по современным дидактическим системам для

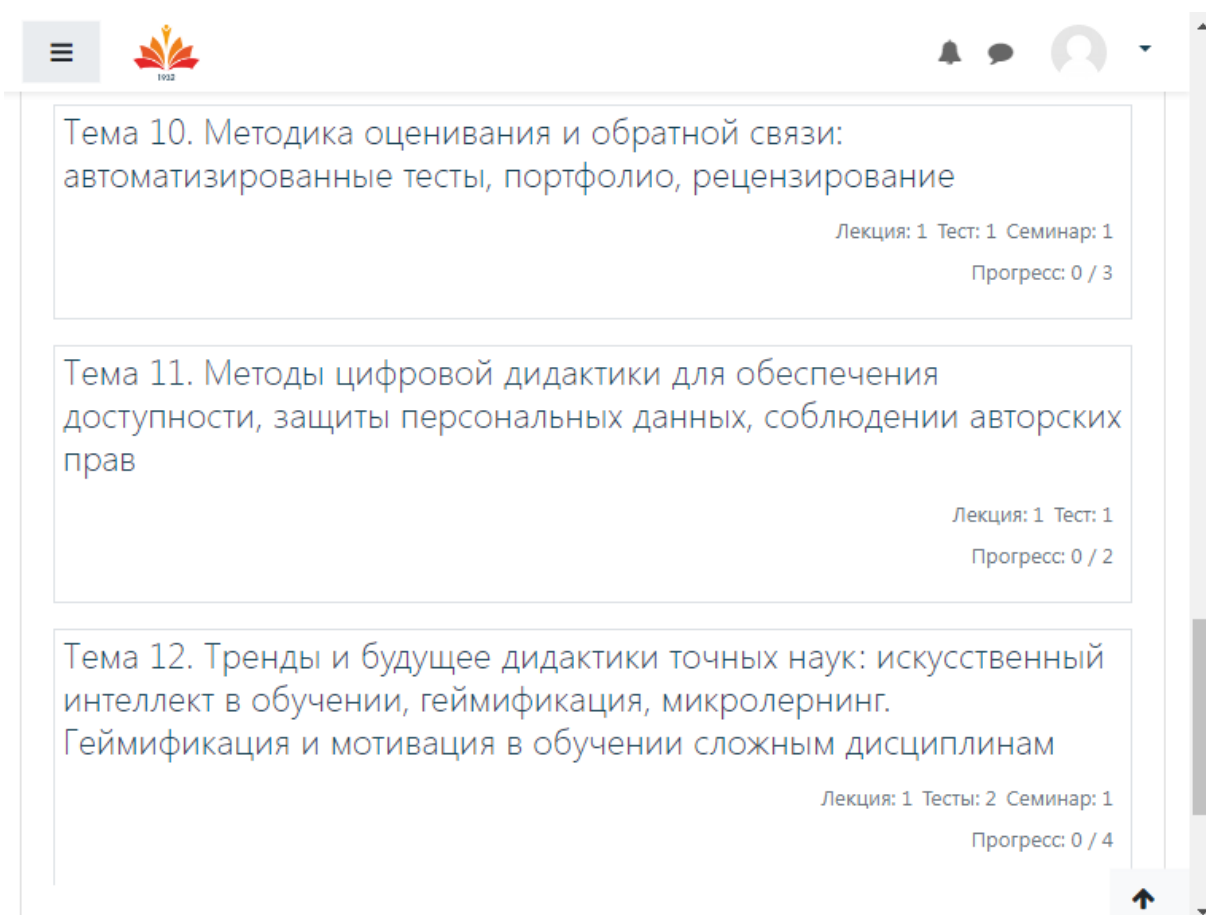


Рис. 4. Тематические модули четвёртой зачётной единицы дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования в системе управления обучением MOODLE.

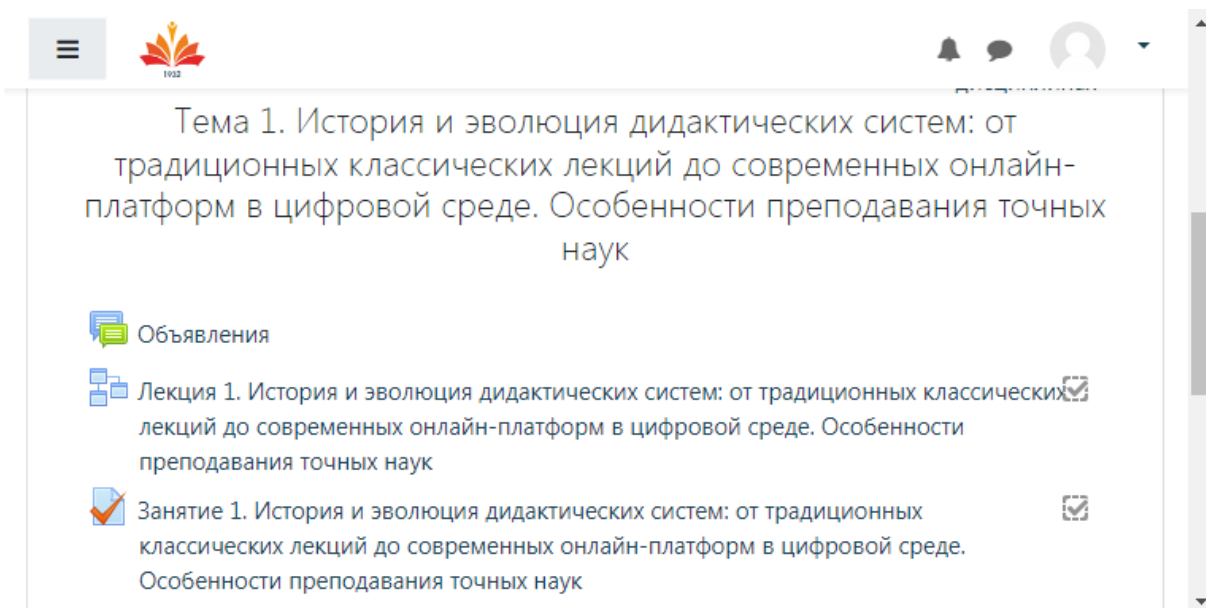


Рис. 5. Страница с элементами первой темы дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования в системе управления обучением MOODLE.

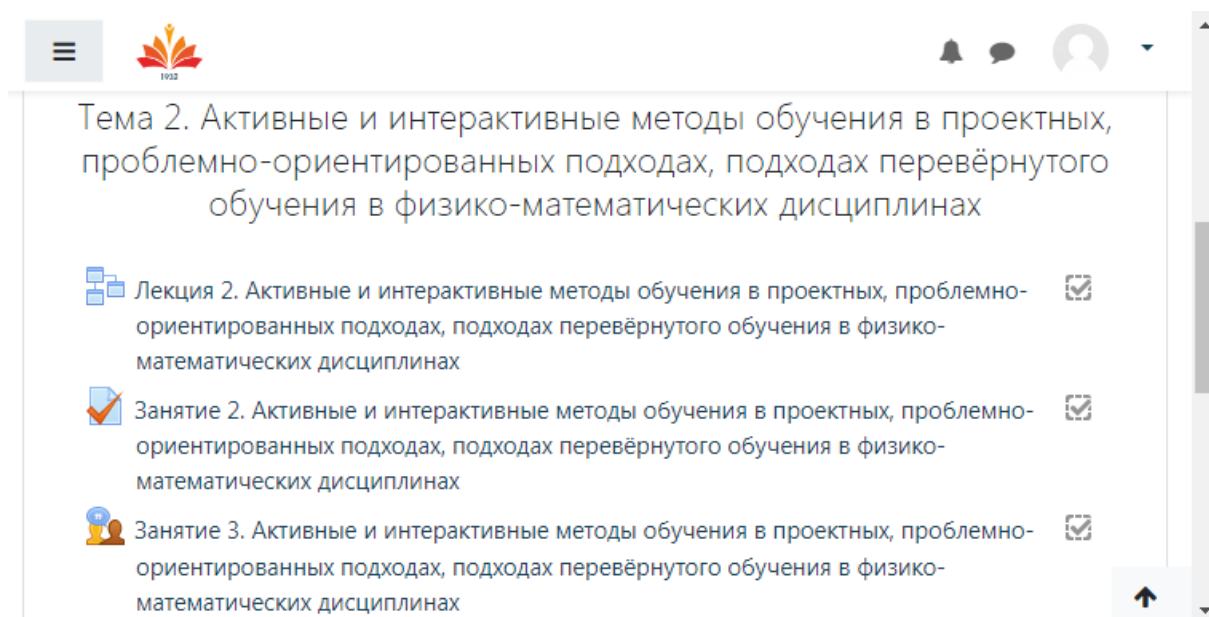


Рис. 6. Страница с элементами второй темы дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования в системе управления обучением MOODLE.

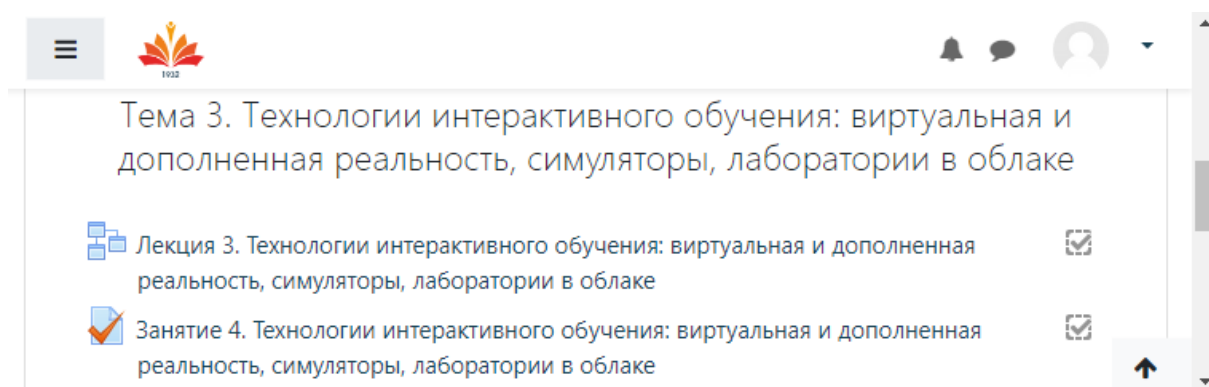


Рис. 7. Страница с элементами третьей темы дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования в системе управления обучением MOODLE.

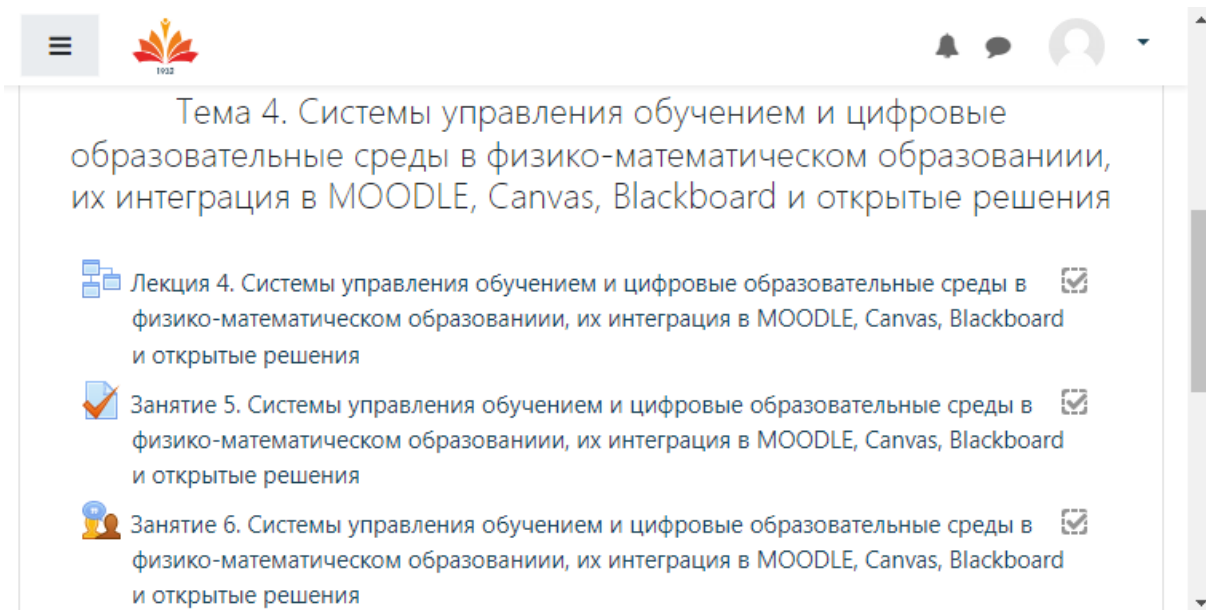


Рис. 8. Страница с элементами четвёртой темы дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования в системе управления обучением MOODLE.

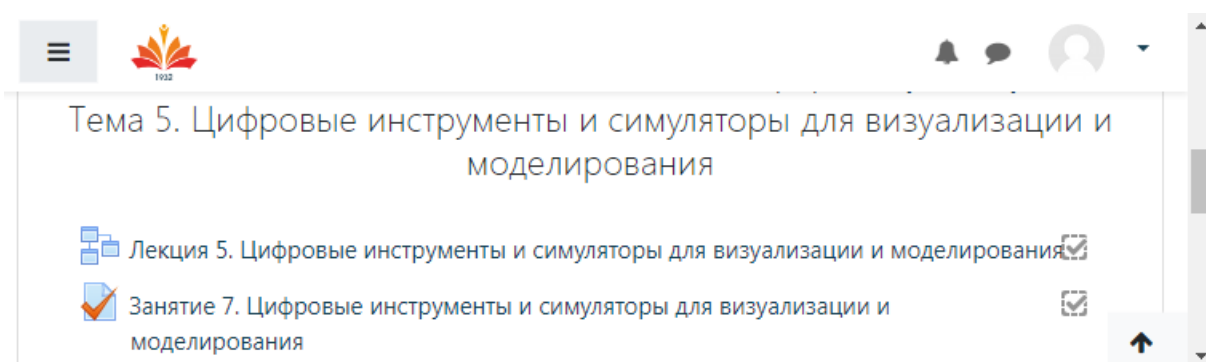


Рис. 9. Страница с элементами пятой темы дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования в системе управления обучением MOODLE.

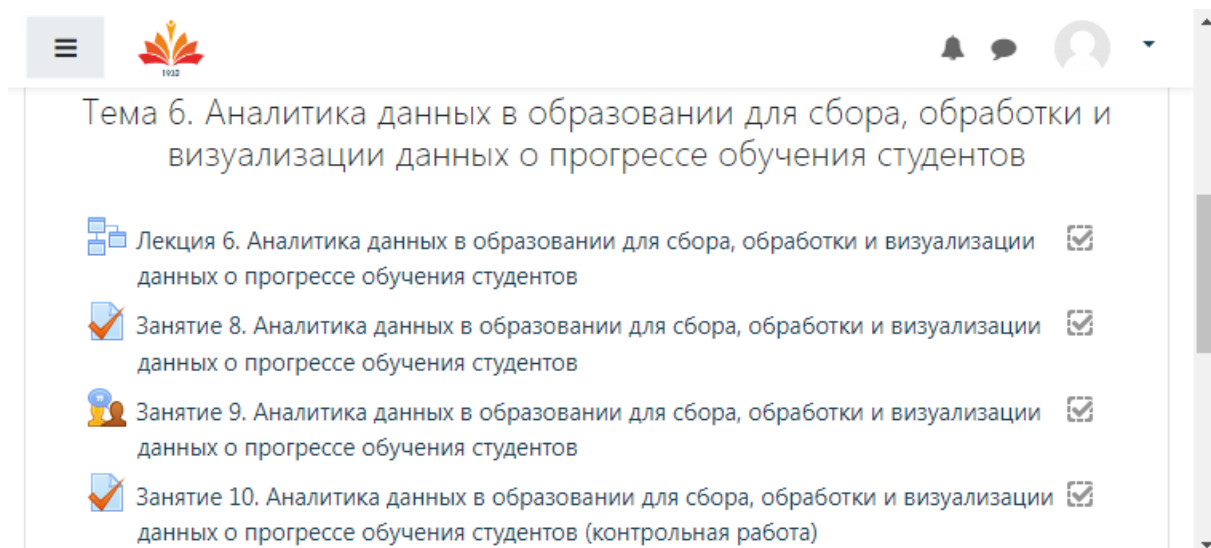


Рис. 10. Страница с элементами шестой темы дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования в системе управления обучением MOODLE.

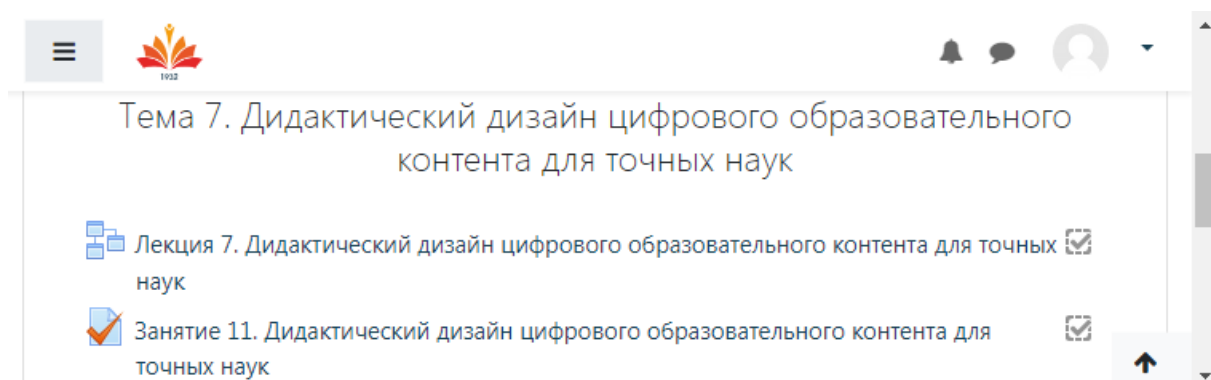


Рис. 11. Страница с элементами седьмой темы дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования в системе управления обучением MOODLE.



Рис. 12. Страница с элементами восьмой темы дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования в системе управления обучением MOODLE.



Рис. 13. Страница с элементами девятой темы дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования в системе управления обучением MOODLE.



Рис. 14. Страница с элементами десятой темы дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования в системе управления обучением MOODLE.



Рис. 15. Страница с элементами одиннадцатой темы дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования в системе управления обучением MOODLE.

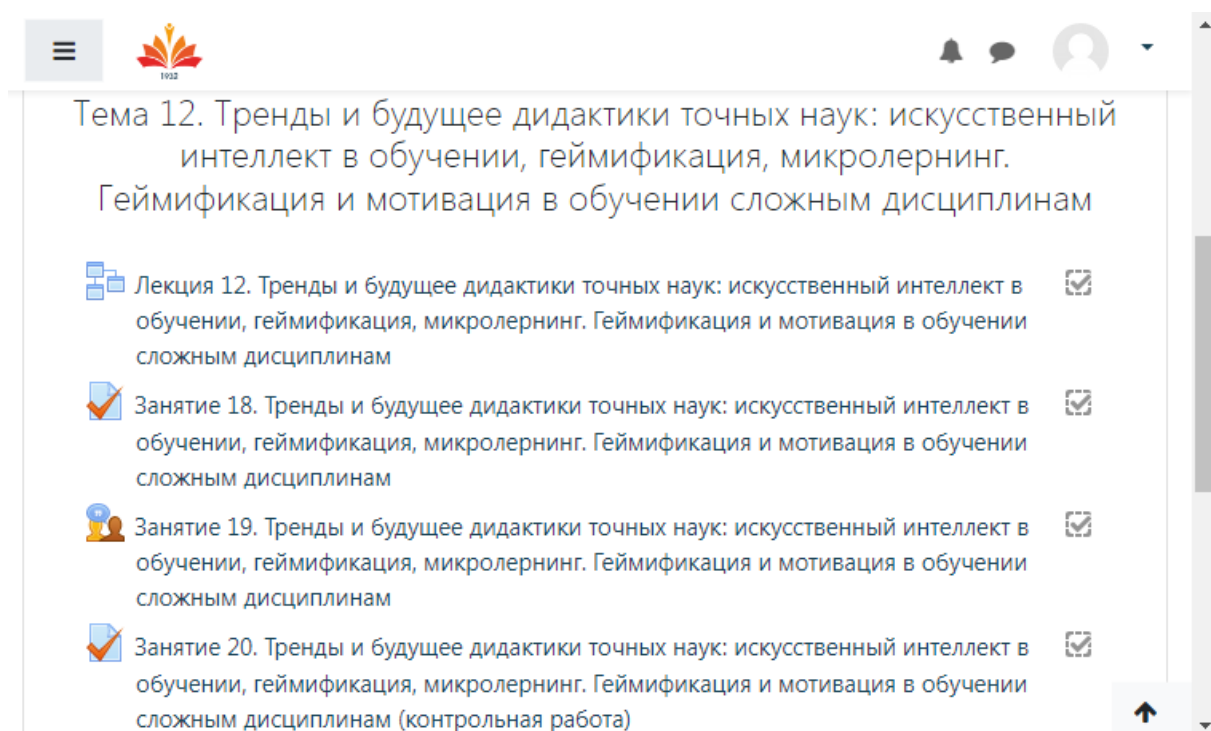


Рис. 16. Страница с элементами двенадцатой темы дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования в системе управления обучением MOODLE.

высшего образования посвящена изучению истории и эволюции дидактических систем: от традиционных классических лекций до современных онлайн-платформ в цифровой среде. Вторая тема дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования посвящена изучению активных и интерактивных методов обучения в проектных, проблемно-ориентированных подходах, подходах перевёрнутого обучения в физико-математических дисциплинах. Третья тема дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования посвящена изучению технологии интерактивного обучения: виртуальная и дополненная реальность, симуляторы, лаборатории в облаке. Четвёртая тема дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования посвящена изучению систем управления обучением и цифровых образовательных сред в физико-математическом образовании, их интеграции в MOODLE, Canvas, Blackboard. Пятая тема дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования посвящена изучению цифровых инструментов и симуляторов для визуализации и моделирования. Шестая тема дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования посвящена изучению аналитики данных в образовании для сбора, обработки и визуализации данных о прогрессе обучения студентов. Седьмая тема дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования посвящена изучению дидактического дизайна цифрового образовательного контента для точных наук. Восьмая тема дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования посвящена изучению методов разработки цифровых учебных материалов в виде электронных книг, интерактивных задач, видеолекций. Девятая тема дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования посвящена изучению формирующего оценивания и адаптивных систем в обучении физике и астрономии. Десятая тема дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования посвящена изучению

методики оценивания и обратной связи: автоматизированные тесты, портфолио, рецензирование. Одиннадцатая тема дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования посвящена изучению методов цифровой дидактики для обеспечения доступности, защиты персональных данных, соблюдении авторских прав. Двенадцатая тема дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования посвящена изучению тенденций и будущего дидактики точных наук.

Заключение

Разработка дистанционного курса по современным дидактическим системам представляет собой итеративный процесс, требующий междисциплинарного подхода. Сочетание научной обоснованности и практической адаптации обеспечивает его актуальность и востребованность в высшем образовании.

В результате исследования можно сформулировать следующие выводы:

1. Разработанный дистанционный курс по современным дидактическим системам для высшего образования соответствует современным требованиям дидактики.
2. Курс по современным дидактическим системам может быть успешно внедрён в образовательный процесс высших учебных заведений.

Гипотеза исследования подтверждена: разработанный курс повышает эффективность обучения.

Теоретическая значимость исследования реализована в полной мере: разработанные материалы способствуют развитию теории дистанционного обучения.

Практическая значимость исследования реализована: курс может быть использован в образовательных учреждениях.

Ожидается, что разработанный курс будет способствовать повышению качества обучения в высшем образовании.

Рекомендуется внедрить разработанный курс в образовательные программы высших учебных заведений.

Список использованных источников

1. A. Ochilov. Kh. Didactic provision of the use of modern educational technologies in improving the competence of management personnel in the sphere of digitization of higher education // International scientific journal. — 2024. — Vol. 3, no. 1. — URL: <https://zenodo.org/doi/10.5281/zenodo.10556232>.
2. On the development of didactic systems in the context of digital transformation of vocational education (part 2) / Irina G. Alyokhina [et al.] // RUDN Journal of Informatization in Education. — 2025. — jun. — Vol. 22, no. 2. — P. 129–149. — URL: <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8631-2025-22-2-129-149>.
3. Leontyeva Irina A. Modern distance learning technologies in higher education: introduction problems // EURASIA journal of mathematics, science and technology education. — 2018. — jun. — Vol. 14, no. 10. — URL: <http://dx.doi.org/10.29333/ejmste/92284>.
4. Stoumpos Angelos I., Stoumpou Rodanthi I. Modern digital and technological educational methods // Trends in higher education. — 2025. — jun. — Vol. 4, no. 2. — P. 25. — URL: <http://dx.doi.org/10.3390/higheredu4020025>.
5. The use of modern technologies to enhance the quality of teaching at higher education institutions / Svitlana Romanyuk [et al.] // Revista Amazonia investiga. — 2023. —

- aug. — Vol. 12, no. 68. — P. 224–235. — URL: <http://dx.doi.org/10.34069/AI/2023.68.08.21>.
6. Vieira Ismael, Baelo Roberto, Peres Paula. Analysis of current didactic models in digital education: a systematic literature review // International journal of educational research open. — 2026. — jun. — Vol. 10. — P. 100540. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijedro.2025.100540>.
 7. Shvedina Svetlana, Fikhtner Oxana. Modern educational technologies for ensuring strategic academic leadership // European proceedings of social and behavioural sciences. — EdCW 2020. — European Publisher, 2021. — jul. — P. 25–34. — URL: <http://dx.doi.org/10.15405/epsbs.2021.07.02.4>.
 8. Chernenko Olexander. Modern pedagogical technologies in higher education // Pedagogy and education management review. — 2020. — dec. — no. 2. — P. 52–59. — URL: <http://dx.doi.org/10.36690/2733-2039-2020-2-52>.
 9. Pliushch Valentina, Sorokun Svitlana. Innovative pedagogical technologies in education system // Revista Tempos e Espaços em Educação. — 2022. — mar. — Vol. 15, no. 34. — P. e16960. — URL: <http://dx.doi.org/10.20952/revtee.v15i34.16960>.
 10. Speech analysis under a Bakhtinian approach: contributions to research on physics education / Fernanda Ostermann [et al.] // Physical review physics education research. — 2023. — jun. — Vol. 19, no. 1. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.19.010141>.
 11. Woitkowski David, Wurmbach Nora Leonie. Assessing German professors' views of nature of science // Physical review physics education research. — 2019. — jan. — Vol. 15, no. 1. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.15.010108>.
 12. Gaining insights through thematic analysis about learning dimensions in teaching learning sequences on surface phenomena in liquids / Giulia Termini [et al.] // Physical review physics education research. — 2025. — nov. — Vol. 21, no. 2. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/4vsw-m71t>.

Сведения об авторах:

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

E-mail: rod_nastay_0000@mail.ru

ORCID iD  0009-0001-1749-7450

Web of Science ResearcherID  ISA-2132-2023

Original article
PACS 01.40.Di
OCIS 000.2060
MSC 97U70

Designing a distance learning course on modern didactic systems for higher education

A. A. Rodionova 

Ulyanovsk State Pedagogical University, 432071, Ulyanovsk, Russia

Submitted February 17, 2026
Resubmitted February 20, 2026
Published March 31, 2026

Abstract. The aim of this study is to develop a distance learning course on modern teaching systems for higher education. The motivation for the study stems from the need to adapt educational processes to the digital environment. The study utilizes methods of analysis, synthesis, and expert evaluation. The hypothesis of the research is that the developed distance learning course will improve the effectiveness of teaching modern teaching systems in higher education. The results of the study include the development of a course structure and the selection of teaching materials. The practical significance of the study lies in the feasibility of applying the developed course in educational institutions.

Keywords: didactic system, course, distance learning course, higher education, digital environment

References

1. A. Ochilov. Kh. Didactic provision of the use of modern educational technologies in improving the competence of management personnel in the sphere of digitization of higher education // International scientific journal. — 2024. — Vol. 3, no. 1. — URL: <https://zenodo.org/doi/10.5281/zenodo.10556232>.
2. On the development of didactic systems in the context of digital transformation of vocational education (part 2) / Irina G. Alyokhina [et al.] // RUDN Journal of Informatization in Education. — 2025. — jun. — Vol. 22, no. 2. — P. 129–149. — URL: <http://dx.doi.org/10.22363/2312-8631-2025-22-2-129-149>.
3. Leontyeva Irina A. Modern distance learning technologies in higher education: introduction problems // EURASIA journal of mathematics, science and technology education. — 2018. — jun. — Vol. 14, no. 10. — URL: <http://dx.doi.org/10.29333/ejmste/92284>.
4. Stoumpos Angelos I., Stoumpou Rodanthi I. Modern digital and technological educational methods // Trends in higher education. — 2025. — jun. — Vol. 4, no. 2. — P. 25. — URL: <http://dx.doi.org/10.3390/higheredu4020025>.
5. The use of modern technologies to enhance the quality of teaching at higher education institutions / Svitlana Romanyuk [et al.] // Revista Amazonia investiga. — 2023. — aug. — Vol. 12, no. 68. — P. 224–235. — URL: <http://dx.doi.org/10.34069/AI/2023.68.08.21>.

6. Vieira Ismael, Baelo Roberto, Peres Paula. Analysis of current didactic models in digital education: a systematic literature review // *International journal of educational research open*. — 2026. — jun. — Vol. 10. — P. 100540. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijedro.2025.100540>.
7. Shvedina Svetlana, Fikhtner Oxana. Modern educational technologies for ensuring strategic academic leadership // *European proceedings of social and behavioural sciences*. — EdCW 2020. — European Publisher, 2021. — jul. — P. 25–34. — URL: <http://dx.doi.org/10.15405/epsbs.2021.07.02.4>.
8. Chernenko Olexander. Modern pedagogical technologies in higher education // *Pedagogy and education management review*. — 2020. — dec. — no. 2. — P. 52–59. — URL: <http://dx.doi.org/10.36690/2733-2039-2020-2-52>.
9. Pliushch Valentina, Sorokun Svitlana. Innovative pedagogical technologies in education system // *Revista Tempos e Espaços em Educação*. — 2022. — mar. — Vol. 15, no. 34. — P. e16960. — URL: <http://dx.doi.org/10.20952/revtee.v15i34.16960>.
10. Speech analysis under a Bakhtinian approach: contributions to research on physics education / Fernanda Ostermann [et al.] // *Physical review physics education research*. — 2023. — jun. — Vol. 19, no. 1. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.19.010141>.
11. Woitkowski David, Wurmbach Nora Leonie. Assessing German professors' views of nature of science // *Physical review physics education research*. — 2019. — jan. — Vol. 15, no. 1. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.15.010108>.
12. Gaining insights through thematic analysis about learning dimensions in teaching learning sequences on surface phenomena in liquids / Giulia Termini [et al.] // *Physical review physics education research*. — 2025. — nov. — Vol. 21, no. 2. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/4vsw-m71t>.

Information about authors:

Anastasia Alexandrovna Rodionova — 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: rod_nastay_0000@mail.ru

ORCID iD  0009-0001-1749-7450

Web of Science ResearcherID  ISA-2132-2023

Секция 2

Физические науки

2.1 Оптика

Научная статья
УДК 535.3
ББК 22.343
ГРНТИ 20.53.23
ВАК 1.3.6.
PACS 42.25.Bs
OCIS 260.2110
MSC 78A10

Исследование закона Бугера–Ламберта–Бера и соотношения Клаузиуса–Моссотти–Лоренца–Лоренца в композитных средах из метаматериалов с отрицательным показателем преломления

К. К. Алтунин ¹

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

Поступила в редакцию 10 февраля 2026 года
После переработки 12 февраля 2026 года
Опубликована 31 марта 2026 года

Аннотация. Рассматривается применение классического закона Бугера–Ламберта–Бера к пластинке из метаматериала с отрицательным показателем преломления. Целью работы является исследование особенностей применения закона Бугера–Ламберта–Бера к метаматериалам с отрицательным показателем преломления, выявление закономерностей распространения света в средах из метаматериалов и анализ границ применимости закона Бугера–Ламберта–Бера в условиях аномальной дисперсии.

Ключевые слова: композит, композитная среда, показатель преломления, диэлектрическая проницаемость, наноматериал, метаматериал, показатель преломления, диэлектрическая проницаемость, метаматериал

¹E-mail: kostya_altunin@mail.ru

Введение

Исследование распространения электромагнитного излучения в метаматериалах с отрицательным показателем преломления представляет собой актуальную задачу современной оптики и материаловедения. Актуальность исследования обусловлена стремительным развитием технологий метаматериалов и необходимостью создания надёжных теоретических основ для проектирования устройств нового поколения в оптике и оптоэлектронике. Исследование оптических свойств композитных сред является актуальным в связи с развитием современных нанотехнологий изготовления наноматериалов и метаматериалов. В данной работе рассматривается применение закона Бугера–Ламберта–Бера к средам из метаматериалов.

Закон Бугера–Ламберта–Бера был экспериментально открыт французским учёным Пьером Бугером в 1729 году, подробно рассмотрен немецким учёным И. Г. Ламбертом в 1760 году и в отношении концентрации проверен на опыте немецким учёным А. Бером в 1852 году.

Целью работы является исследование физических особенностей применения закона Бугера–Ламберта–Бера к метаматериалам с отрицательным показателем преломления, выявление закономерностей распространения света в средах из метаматериалов, установление взаимосвязи между макроскопическими оптическими характеристиками и микроскопической структурой композитных сред и анализ границ применимости закона Бугера–Ламберта–Бера в условиях аномальной дисперсии.

Задачи исследования состоят в том, чтобы проанализировать литературу по оптическим параметрам композитных сред, проанализировать физическую сущность закона Бугера–Ламберта–Бера в контексте распространения волн в средах с отрицательным показателем преломления, исследовать фундаментальные соотношения между показателем преломления и микроскопическими параметрами среды, исследовать влияние параметров метаматериала (ε , μ , γ) с отрицательным показателем преломления на характер ослабления оптического излучения, разработать математическую модель для описания распространения света в среде с отрицательным показателем преломления композитных сред, учитывающую влияние дисперсионных свойств на оптические характеристики.

Мотивация исследования заключается в том, что метаматериалы с отрицательным показателем преломления открывают новые возможности в оптике и оптоэлектронике, требующие пересмотра фундаментальных законов для понимания поведения сред из метаматериалов в оптоэлектронных приборах и устройствах.

Объектом исследования является совокупность композитных сред с различными структурами из метаматериалов с отрицательным показателем преломления, которые характеризуются одновременным отрицательным значением диэлектрической ($\varepsilon < 0$) и магнитной ($\mu < 0$) проницаемостей. Предметом исследования выступает физический процесс распространения электромагнитных волн в среде с отрицательным показателем преломления с учётом закономерностей ослабления интенсивности электромагнитного излучения при прохождении через метаматериалы с отрицательным показателем преломления в рамках закона Бугера–Ламберта–Бера.

Гипотеза научного исследования заключается в том, что закон Бугера–Ламберта–Бера сохраняет свою математическую форму для метаматериалов с отрицательным показателем преломления при условии корректного определения коэффициента поглощения и учёта физических эффектов, учитывающих возможность поглощения или усиления оптического излучения в метаматериалах.

Методы исследования включают в себя анализ литературы по существующим исследованиям, теоретический анализ существующих моделей, математическое моделирование оптических процессов в композитных средах. Материалы исследования включают

в себя теоретические работы по электродинамике сред с отрицательными параметрами, данные по показателям преломления различных сред, результаты численного моделирования распространения электромагнитных волн в слоистых метаструктурах с контролируемым показателем преломления, данные по оптическим свойствам метаматериалов различных типов.

Научная новизна исследования состоит в том, что впервые предложена обобщённая модель для расчёта эффективного показателя преломления композитных сред с учётом применимости закона Бугера–Ламберта–Бера к средам с одновременным отрицательным ϵ и μ .

Теоретическая значимость исследования заключается в том, что результаты исследования расширяют фундаментальные представления о распространении электромагнитных волн в средах из метаматериалов, развита теория взаимодействия излучения с метаматериалами на основе согласованного описания фазовых и амплитудных характеристик с учётом применимости классического закона ослабления оптического излучения.

Практическая значимость исследования заключается в том, что полученные результаты могут быть использованы при разработке новых оптоэлектронных устройств на основе метаматериалов с заданным коэффициентом пропускания, выполнена оптимизация параметров метаматериалов для задач маскировки и управления излучением, созданы новые типы оптических фильтров и поглотителей с управляемыми характеристиками.

Обзор

Закон Бугера–Ламберта–Бера, описывающий поглощение света $I(x) = I_0 \exp(-\gamma x)$, нуждается в модификации для метаматериалов с отрицательным показателем преломления, поскольку их поведение регулируется комплексной диэлектрической проницаемостью ϵ и проницаемостью μ , где обе отрицательны $\epsilon < 0$, $\mu < 0$ в определённом диапазоне частот, что приводит к антипараллельным фазовым/групповым скоростям и левосторонности, но фундаментальный принцип поглощения (Бера–Ламберта) всё ещё применим, только описанный с комплексными n и внутренними потерями, часто через теории эффективной среды, такие как теория Максвелл–Гарнетта.

Гонка за созданием метаматериалов с отрицательным показателем преломления в оптическом диапазоне началась шесть лет назад с создания материалов с отрицательным показателем преломления для гигагерцовых частот. Одним из подходов является полная миниатюризация гигагерцовых резонансных структур. Альтернативные конструкции используют локализованные плазмонно-резонансные металлические наночастицы или нанотверстия в металлических пленках. Следуя этому подходу, совсем недавно был получен отрицательный показатель преломления в оптическом диапазоне. В статье [1] рассматриваются эти недавние результаты и суммируем способы однозначного определения эффективного показателя преломления тонких слоёв на основе данных, доступных для измерений. В статье [1] численное моделирование показывает, что композитный материал, состоящий из серебряных полос и усиливающего материала, может иметь отрицательный показатель преломления -1.3 и 100% пропускание одновременно.

В статье [2] представлены экспериментальные данные по рассеянию на микроволновых частотах на структурированном метаматериале, обладающем полосой частот, где эффективный показатель преломления отрицателен. Материал состоит из двумерного массива повторяющихся элементарных ячеек из медных полосок и кольцевых резонаторов, расположенных на переплетённых полосках из стандартного материала печатной платы. Измеряя угол рассеяния прошедшего через призму, изготовленную из этого

материала, в статье [2] определяем значение эффективного показателя преломления, соответствующее закону Снеллиуса. В статье [2] показано, что эти эксперименты напрямую подтверждают предсказания уравнений Максвелла, согласно которым показатель преломления определяется как отрицательный квадратный корень из $\epsilon\mu$ для частот, где как диэлектрическая проницаемость (ϵ), так и проницаемость (μ) отрицательны. Теперь возможны конфигурации геометрически оптических конструкций, которые невозможно реализовать с помощью материалов с положительным показателем преломления.

В статье [3] экспериментально продемонстрировали хиральный метаматериал, обладающий отрицательным показателем преломления на терагерцевых частотах. В статье [3] показано, что наличие сильной хиральности в терагерцевом метаматериале снимает вырождение для двух волн с круговой поляризацией и позволяет достичь отрицательного показателя преломления без одновременного наличия отрицательной диэлектрической и отрицательной магнитной проницаемости. В статье [3] показано, что реализация терагерцевых хиральных метаматериалов с отрицательным показателем преломления открывает возможности для исследования их новых электромагнитных свойств, таких как отрицательное преломление и отрицательное отражение, а также для важных приложений в терагерцевых устройствах.

Электрооптические модуляторы обычно изготавливаются из неорганических материалов, таких как LiNbO_3 , но замена их органическими электрооптическими материалами, то есть материалами с оптическими свойствами, которые изменяются в ответ на электрическое поле, может быть многообещающей альтернативой, поскольку они обеспечивают широкую полосу пропускания, простоту обработки и относительно низкую стоимость. В статье [4] включается легированный, спитый органический электрооптический полимер в гибридные полимерные/золь-гель волноводные модуляторы с исключительными характеристиками. Полуволновые напряжения полученных модуляторов Маха-Цендера и фазовых модуляторов на длине волны 1550 нм составляют 1 В и 2.5 В соответственно. Уникальные свойства золь-гель материалов оболочки, используемых в гибридной структуре, приводят к 100% эффективности поляризации устройства, что приводит к соответствующим внутриустройственным электрооптическим коэффициентам 138 пм В^{-1} и 170 пм В^{-1} в модуляторах Маха-Цендера и фазовых модуляторах. Эти результаты впервые демонстрируют внутриустройственные электрооптические коэффициенты, которые в пять-шесть раз превышают соответствующие показатели эталонного неорганического материала.

В статье [5] на основе полновекторного трёхмерного подхода Максвелла-Блоха исследуется возможность использования усиления для преодоления потерь в метаматериале с отрицательным показателем преломления, напоминающем рыболовную сеть. В статье [5] показано, что соответствующее размещение оптически накачиваемых лазерных краевых усилителей (усиление) в структуре метаматериала приводит к образованию полосы частот, в которой небиянизотропный метаматериал становится усиливающим. В этой области как действительная, так и мнимая части эффективного показателя преломления одновременно становятся отрицательными, а коэффициент качества расходится в двух различных частотных точках.

В статье [6] разработаны, изготовлены и экспериментально исследованы композитные панели толщиной 2.7 мм с отрицательным показателем преломления в диапазоне частот от 8.4 до 9.2 ГГц. В статье [6] композитный метаматериал изготовлен с использованием традиционной коммерческой литографии многослойных печатных плат; трехмерная физическая (в отличие от электромагнитной) структура создается с помощью переходных отверстий для формирования участков рассеивающих элементов в направлении, перпендикулярном поверхностям печатной платы. На основе измерений параметров рассеяния в статье [6] показано, что комплексная диэлектрическая проницаемость,

магнитная проницаемость, показатель преломления и импеданс композита могут быть однозначно определены. В статье [6] показано, что измерения позволяют количественно определить полосу отрицательного показателя преломления и связанные с ней потери. В статье [6] показано, что извлеченные параметры материала находятся в отличном согласии с результатами моделирования.

В статье [7] разработана модель эффективной среды для неупорядоченных метаматериалов, содержащих пространственно случайное распределение диэлектрических сфер. Подобно моделям эффективной среды для упорядоченных метаматериалов, эта модель предсказывает резонансы эффективной магнитной проницаемости и диэлектрической проницаемости, возникающие из-за электрических и магнитных дипольных резонансов Ми в сферах. Кроме того, в статье [7] модель предсказывает сдвиг электрического резонанса в красную сторону с увеличением количества частиц. Интересно, что когда количество частиц превышает порог перколяции в 33 %, модель предсказывает перекрытие электрического резонанса с магнитным резонансом, что приводит к отрицательному показателю преломления.

В статье [8] анализируется использование слоистых сверхпроводников в качестве сильно анизотропных метаматериалов, которые могут обладать отрицательным показателем преломления в широком диапазоне частот. Сверхпроводники представляют особый интерес, поскольку они потенциально способны обеспечивать низкие потери, что имеет решающее значение для таких применений, как сверхразрешающая визуализация.

Модель

Относительное изменение интенсивности света в каждом таком слое dx не зависит от интенсивности и пропорционально толщине этого слоя, что следует из энергетических соображений.

$$\frac{dI}{I} = -\gamma dx, \quad (1)$$

Закон Бугера-Ламберта-Бера является фундаментальным соотношением в оптике, описывающим ослабление интенсивности электромагнитного излучения при прохождении через поглощающую среду. Закон Бугера-Ламберта-Бера описывает ослабление интенсивности электромагнитного излучения при прохождении через поглощающую среду. Классический закон Бугера-Ламберта-Бера описывает экспоненциальное убывание интенсивности света при прохождении через однородную среду. В классическом виде закон Бугера-Ламберта-Бера записывается следующим образом:

$$I(x) = I_0 \exp(-\gamma x), \quad (2)$$

где I_0 – начальная интенсивность падающего излучения, $I(x)$ – интенсивность прошедшей волны после прохождения излучением слоя, γ – коэффициент поглощения среды, связанный с ослаблением излучения в среде, x – толщина поглощающего слоя или путь, пройденный светом в материале пластины.

Для материалов с отрицательными показателями преломления обычное поведение ослабления меняется вследствие особых эффектов, вызванных изменением направления фазовых фронтов и возможной инверсии поглощения. Однако для метаматериалов, обладающих необычными оптическими характеристиками, включая отрицательные показатели преломления, необходимо учитывать особенности распространения электромагнитных волн в средах из метаматериалов. Рассмотрим особенности метаматериалов с отрицательным эффективным показателем преломления. Метаматериалы с отрицательным показателем преломления ($n < 0$) обладают рядом уникальных физических

свойств: противоположное направление фазовой и групповой скоростей волны, выполнение соотношения $n = -\sqrt{\varepsilon\mu}$, где ε и μ – отрицательные диэлектрическая и магнитная проницаемости соответственно. При этом закон Бугера–Ламберта–Бера сохраняет свою форму при соблюдении следующих условий: однородность и изотропия среды на макроскопическом уровне, отсутствие рассеяния и отражения на границах (либо их отдельный учёт), корректное определение коэффициента поглощения γ для заданной частоты и поляризации. Для пластинки из метаматериала с отрицательным показателем преломления толщиной d_1 закон Бугера–Ламберта–Бера принимает следующий вид:

$$I(d_1) = I_0 \exp(-\gamma d_1) , \quad (3)$$

где γ – коэффициент поглощения излучения ($\gamma \geq 0$, несмотря на $n < 0$), d_1 – геометрическая толщина пластинки.

При применении закона к метаматериалам следует учитывать следующие особенности. Отрицательный показатель преломления влияет на фазовые характеристики волны (направление фазового фронта), но не изменяет экспоненциальную зависимость интенсивности от толщины при поглощении. Коэффициент поглощения γ может демонстрировать сильную зависимость от частоты излучения и параметров метаматериала (ε, μ), однако его значение всегда остаётся неотрицательным.

При необходимости учёта отражения на границах раздела сред в формулу вводится дополнительный множитель T_0 (коэффициент пропускания границ):

$$I(d_1) = I_0 T_0 \exp(-\gamma d_1) . \quad (4)$$

Проанализируем прохождение плоской монохроматической волны через пластину толщиной d_1 . Если среда обладает комплексным показателем преломления $n = n' + in''$, распространение волны описывается выражением:

$$T(d_1) = |t|^2 \exp[-(\beta'' + i\beta')d_1] , \quad (5)$$

где $\beta' = k_0 n'$, $\beta'' = k_0 n''$, $k_0 = \omega/c$ (частота ω , скорость света c), $|t|$ – коэффициент пропускания на границе раздела сред. Финальная формула пропускания приобретает вид:

$$I_{\text{out}}(d_1) = I_0 |t|^2 e^{-k_0 n'' d_1} e^{ik_0 n' d_1} . \quad (6)$$

Особенность здесь заключается в том, что действительная составляющая β' влияет на сдвиг фазы волны, а мнимая компонента β'' определяет характер изменения амплитуды, поскольку положительное значение β'' приводит к поглощению, отрицательное значение β'' приводит к усилению оптического излучения, прошедшего через пластинку. Таким образом, для случая метаматериалов обобщённая форма записи физического закона Бугера–Ламберта–Бера примет следующий вид:

$$I_{\text{out}}(d_1) = I_0 |t|^2 e^{-\gamma d_1} , \quad (7)$$

где γ учитывает зависимость от конкретных характеристик метаматериала и условий эксперимента.

Рассмотрим физические особенности применения закона Бугера–Ламберта–Бера к метаматериалам. Для метаматериалов с отрицательным показателем преломления, где показатель преломления $n < 0$, формальное применение закона Бугера–Ламберта–Бера может привести к кажущемуся экспоненциальному возрастанию интенсивности, что противоречит закону сохранения энергии. Для корректного описания необходимо учитывать физические механизмы, обеспечивающие отрицательный показатель преломления и поглощение энергии.

Предположим, что метаматериал имеет толщину d_1 и отрицательный показатель преломления $n = -|n|$. Тогда волновой вектор внутри материала будет $k = n\frac{\omega}{c}$, где ω – частота света, а c – скорость света в вакууме. Учитывая, что в метаматериалах с отрицательным показателем преломления поглощение может происходить за счет различных механизмов (например, резистивные потери в металлических элементах), мы можем ввести эффективный коэффициент поглощения γ_{eff} , который учитывает эти потери. Тогда закон Бугера–Ламберта–Бера примет вид:

$$I(x) = I_0 \exp(-\gamma_{\text{eff}}x) . \quad (8)$$

Важно отметить, что γ_{eff} должен быть положительным, чтобы обеспечить уменьшение интенсивности света при распространении в материале и соответствовать закону сохранения энергии.

Рассмотрим пластинку из метаматериала толщиной d_1 , имеющего комплексный показатель преломления $n = n' + in''$, где $n' < 0$, а $n'' > 0$ (поглощение). В классическом подходе коэффициент поглощения связан с мнимой частью показателя преломления соотношением:

$$\alpha = \frac{4\pi}{\lambda}n'' , \quad (9)$$

где λ – длина волны в вакууме. Тогда, формально подставляя в уравнение (2), получаем:

$$I(d_1) = I_0 e^{-\gamma d_1} . \quad (10)$$

Поскольку $\gamma > 0$, интенсивность убывает с ростом d_1 , что кажется корректным. Однако проблема возникает при рассмотрении направления волнового вектора и вектора Умова–Пойнтинга.

Рассмотрим проблему с направлением потока энергии в метаматериалах. В метаматериалах с отрицательным показателем преломления вектор Умова–Пойнтинга \vec{S} (направление потока энергии) направлен противоположно волновому вектору \mathbf{k} . Это означает, что если волна распространяется в положительном направлении оси x , то поток энергии направлен в отрицательном направлении. При этом, если мы формально используем закон Бугера–Ламберта–Бера, как будто среда «поглощает» энергию на пути распространения волны, то мы должны учитывать, что энергия фактически «возвращается» обратно. Это может привести к кажущемуся возрастанию интенсивности при движении вглубь среды, если не учитывать правильное направление потока энергии.

Рассмотрим парадокс экспоненциального возрастания, который иногда встречается в литературе: если $n' < 0$, то в некоторых формализмах предлагают использовать $\alpha = -\frac{4\pi}{\lambda}n''$, что даёт:

$$I(d_1) = I_0 e^{\alpha d_1} , \quad \text{при } \alpha > 0 , \quad (11)$$

что означает экспоненциальный рост интенсивности с глубиной — явное нарушение закона сохранения энергии. Этот результат является следствием неправильной интерпретации знака коэффициента поглощения. На самом деле, поглощение всегда должно приводить к уменьшению интенсивности, независимо от знака действительной части показателя преломления.

Выполним проверку закона сохранения энергии. Рассмотрим энергетический баланс для слоя метаматериала толщиной d_1 . Полная мощность, падающая на пластинку, равна $P_{\text{in}} = I_0 A$, где A – площадь поперечного сечения. Мощность, вышедшая из пластинки, равна $P_{\text{out}} = I(d_1) A$. Мощность, поглощённая в среде, равна:

$$P_{\text{abs}} = P_{\text{in}} - P_{\text{out}} = I_0 A (1 - e^{-\gamma d_1}) > 0 . \quad (12)$$

Это выражение положительно и убывает с увеличением d_1 , что соответствует физической реальности — энергия поглощается, а не генерируется. Таким образом, даже в случае $n' < 0$, если правильно определить $\gamma > 0$, закон Бугера–Ламберта–Бера не нарушает закон сохранения энергии. Рассмотрим корректную формулировку для метаматериалов. Правильный подход состоит в следующем: коэффициент поглощения γ всегда положителен: $\gamma = \frac{4\pi}{\lambda}|n''|$, закон Бугера–Ламберта–Бера применяется без изменения: $I(x) = I_0 \exp(-\gamma x)$, направление потока энергии (вектор Умова–Пойнтинга) определяется отдельно и не влияет на величину поглощения, при расчёте отражения и преломления необходимо использовать полную теорию Максвелла с учётом знака n' . Выполним проверка закона сохранения энергии для следующим формул. Исходная задача касается проверки закона сохранения энергии для полученного выражения выхода интенсивности:

$$I_{\text{out}} = I_0 |t|^2 \exp(\gamma d_1) , \quad (13)$$

которое могло бы подразумевать противоречие закону сохранения энергии, если бы предполагало неограниченный рост интенсивности. Полная энергия, входящая в метаматериал, должна равняться сумме энергии, вышедшей из материала, и энергии, поглощённой в материале:

$$E_{\text{in}} = E_{\text{out}} + E_{\text{absorption}} . \quad (14)$$

В терминах интенсивности это можно записать как:

$$I_0 = I(d_1) + I_{\text{absorption}} , \quad (15)$$

где $I_{\text{absorption}}$ — интенсивность поглощенного света. Подставляя выражение для $I(d_1)$ из модифицированного закона Бугера–Ламберта–Бера, получаем:

$$I_0 = I_0 \exp(-\gamma_{\text{eff}} d_1) + I_{\text{absorption}} . \quad (16)$$

Отсюда можно выразить поглощенную интенсивность:

$$I_{\text{absorption}} = I_0 (1 - e^{-\gamma_{\text{eff}} d_1}) . \quad (17)$$

Это уравнение показывает, что часть входящей энергии поглощается в метаматериале, что соответствует закону сохранения энергии. Важно понимать, что формальное применение закона Бугера–Ламберта–Бера с отрицательным коэффициентом поглощения не имеет физического смысла. Корректный подход требует введения эффективного коэффициента поглощения, который учитывает все механизмы потерь в метаматериале. При этом закон сохранения энергии должен выполняться, то есть интенсивность света должна уменьшаться при распространении в материале.

Выполним анализ закона сохранения энергии для пластины из метаматериала. Согласно закону сохранения энергии, полная энергия системы должна оставаться неизменной:

$$E_{\text{in}} = E_{\text{out}} . \quad (18)$$

Проверим это соотношение отдельно для каждой составляющей энергии. Интегрируя энергию входящего пучка вдоль всей толщины образца d_1 , получаем:

$$E_{\text{in}} = \int_0^{d_1} I_0 dx = I_0 d_1 . \quad (19)$$

Рассчитаем выходящую энергию аналогично, используя найденное ранее выражение:

$$E_{\text{out}} = \int_0^{d_1} I_{\text{out}} dx = \int_0^{d_1} I_0 |t|^2 e^{\gamma x} dx . \quad (20)$$

Выполнив интегрирование, находим:

$$E_{\text{out}} = I_0 |t|^2 \left(\frac{e^{\gamma d_1} - 1}{\gamma} \right). \quad (21)$$

Рассмотрим баланс энергий. Требуемый баланс энергий подразумевает выполнение условия:

$$E_{\text{in}} = E_{\text{out}}. \quad (22)$$

Закон сохранения энергии утверждает, что общая энергия в замкнутой системе остаётся постоянной. На основании вышеизложенного, можем записать:

$$\Delta E = E_{\text{in}} - E_{\text{out}} = 0. \quad (23)$$

Подставляя полученные выражения, приходим к следующему условию:

$$I_0 d_1 = I_0 |t|^2 \left(\frac{e^{\gamma d_1} - 1}{\gamma} \right). \quad (24)$$

Разделим обе стороны уравнения на I_0 , получим:

$$d_1 = |t|^2 \left(\frac{e^{\gamma d_1} - 1}{\gamma} \right). \quad (25)$$

Отсюда ясно, что такое равенство возможно лишь при строгих ограничениях на величину γ .

Для метаматериалов можно рассмотреть сценарий, в котором используется отрицательный показатель преломления $n < 0$. В этом случае, закон можно модифицировать следующим образом:

$$I = I_0 \exp(-\gamma d_1). \quad (26)$$

Здесь потеря энергии представляется как экспоненциальное увеличение интенсивности, что, как вы правильно заметили, может привести к противоречию с законом сохранения энергии. Если I возрастает при перемещении через материал, это подразумевает, что какая-то форма энергии должна быть добавлена в систему.

Рассмотрим модель на основе соотношения Клаузиуса-Моссотти и Лоренца-Лоренца в композитных средах. Комплексный показатель преломления среды n определяется выражением:

$$n(\omega) = \sqrt{\varepsilon(\omega) \mu(\omega)} = n'(\omega) + i n''(\omega), \quad (27)$$

где ε – диэлектрическая проницаемость среды, а μ – магнитная проницаемость среды, $n''(\omega)$ – коэффициент экстинкции.

В общем случае диэлектрическая проницаемость может быть представлена в виде:

$$\varepsilon(\omega) = 1 + \chi(\omega), \quad (28)$$

где $\chi(\omega)$ – диэлектрическая восприимчивость вещества.

Принцип причинности накладывает важные ограничения на дисперсионные соотношения. Согласно теореме Крамерса–Кронига:

$$\chi(\omega) = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\text{Im} \chi(\omega')}{\omega' - \omega} d\omega', \quad (29)$$

где P обозначает главное значение интеграла.

Для неполярных молекул соотношение Клаузиуса–Моссотти имеет вид:

$$\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} = \frac{1}{3\varepsilon_0} (f_i N_i \alpha_i + (1 - f_i) N_m \alpha_m) , \quad (30)$$

где N_i – концентрация наноразмерных включений в композитной среде, α_i – поляризуемость наноразмерных включений в композитной среде, N_m – концентрация носителей электрического заряда в матрице композитной среды, α_m – поляризуемость носителей электрического заряда в матрице композитной среды, f_i – фактор заполнения наноразмерными включениями композитной среды.

Для полярных молекул в соотношение Клаузиуса–Моссотти вводится дополнительная поправка:

$$\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} = \frac{1}{3\varepsilon_0} \left(f_i N_i \alpha_i + (1 - f_i) N_m \alpha_m + N \frac{p^2}{3k_B T} \right) , \quad (31)$$

где p – электрический дипольный момент, k_B – постоянная Больцмана, T – температура.

Для неполярных молекул соотношение Лоренца–Лоренца имеет вид:

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \frac{1}{3\varepsilon_0} (f_i N_i \alpha_i + (1 - f_i) N_m \alpha_m) , \quad (32)$$

где N_i – концентрация наноразмерных включений в композитной среде, α_i – поляризуемость наноразмерных включений в композитной среде, N_m – концентрация носителей электрического заряда в матрице композитной среды, α_m – поляризуемость носителей электрического заряда в матрице композитной среды, f_i – фактор заполнения наноразмерными включениями композитной среды.

Для полярных молекул в соотношение Лоренца–Лоренца вводится дополнительная поправка:

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \frac{1}{3\varepsilon_0} \left(f_i N_i \alpha_i + (1 - f_i) N_m \alpha_m + N \frac{p^2}{3k_B T} \right) , \quad (33)$$

где p – электрический дипольный момент, k_B – постоянная Больцмана, T – температура.

Соотношение Лоренца–Лоренца связывает показатель преломления с поляризуемостью вещества:

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \frac{1}{3\varepsilon_0} (f_i N_i \alpha_i + (1 - f_i) N_m \alpha_m) . \quad (34)$$

В случае композитных сред соотношение Лоренца–Лоренца имеет вид:

$$\frac{n_{\text{eff}}^2 - 1}{n_{\text{eff}}^2 + 2} = \sum_i f_i \frac{n_i^2 - 1}{n_i^2 + 2} , \quad (35)$$

где f_i – объёмная доля i -й компоненты в композитной среде.

Дисперсионное уравнение для показателя преломления i -й компоненты в композитной среде имеет вид:

$$n_i^2(\omega) = 1 + \frac{\omega_{pi}^2}{\omega_{0i}^2 - \omega^2 - i\gamma_i\omega} , \quad (36)$$

где ω_{pi} – плазменная частота i -й компоненты в композитной среде, ω_{0i} – собственная частота i -й компоненты в композитной среде, γ_i – коэффициент затухания i -й компоненты в композитной среде.

Описание блоков компьютерной программы

Для проведения численных расчетов был разработан программный комплекс на языке Python 2.7.

Выполним импорт библиотек.

```

1 #from numpy import *
  import numpy as np
3 import matplotlib.pyplot as plt

```

Листинг 2.1. Импорт библиотек

Опишем параметры модели.

```

1 B0 = 0.6961663
  B1 = 0.4079426
3 B2 = 0.8974794
  lambda0 = 0.0284043
5 lambda1 = 0.0240840
  lambda2 = 0.0240840
7
  f = 0.3 # volume fraction of inclusions
9 n_inclusion = 1.5 # refractive index of inclusions

```

Листинг 2.2. Параметры модели

Опишем функцию расчёта показателя преломления.

```

1 def sellmeier(wavelength):
  wavelength2 = wavelength**2
3   n2 = 1 + B0*wavelength2/(wavelength2-lambda0**2) + \
        B1*wavelength2/(wavelength2-lambda1**2) + \
5   B2*wavelength2 / (wavelength2-lambda2**2)
  return sqrt(n2)

```

Листинг 2.3. Функция Зельмейера

Опишем функцию для расчёта эффективных параметров композитной среды.

```

def effective_parameters(wavelength):
2   n_matrix = Sellmeier(wavelength)
  n_eff = (n_matrix**3 + 3.0*f*(n_inclusion**2 - n_matrix**2))/\
4   (1.0 + 3.0*f*(n_inclusion**2/n_matrix**2 - 1))
  epsilon_eff = n_eff**2
6   Z = sqrt((epsilon_eff - 1.0)/(epsilon_eff + 1.0))
  return n_eff, epsilon_eff, Z

```

Листинг 2.4. Эффективные параметры

Опишем функцию, предназначенную для расчёта оптических характеристик композитной среды.

```

1 def optical_properties(Z):
  R = abs((Z - 1)/(Z + 1))**2 # reflectance
3   T = 1.0/(1.0+abs((Z - 1)/(Z + 1))**2) # transmittance
  A = 1-R-T # absorptance
5   return R, T, A

```

Листинг 2.5. Оптические характеристики

Компьютерная программа выполняет следующие основные функции: инициализацию параметров модели, расчёт показателя преломления по формуле Зельмейера, вычисление эффективных параметров композитной среды, определение оптических характеристик композитной среды, построение графиков зависимостей. Компьютерная программа позволяет получить следующие зависимости: зависимость эффективного показателя преломления от длины волны излучения, зависимость эффективной диэлектрической проницаемости от длины волны излучения, зависимость эффективный поверхностный импеданс от длины волны излучения, зависимость коэффициентов отражения, пропускания и поглощения от длины волны излучения.

Заключение

Полученные соотношения позволяют описывать оптические свойства композитных сред с учётом их микроскопической структуры. Важным результатом является установление связи между макроскопическими оптическими характеристиками и микроскопическими параметрами композитной среды.

Выводы могут быть сформулированы следующим образом:

- закон Бугера–Ламберта–Бера в классической форме $I = I_0 \exp(-\gamma d)$ сохраняет применимость для метаматериалов при корректном определении коэффициента поглощения γ ,
- подтверждена универсальность соотношения Лоренца–Лоренца для композитных сред из метаматериалов для описания взаимосвязи между эффективным показателем преломления и микроструктурными параметрами,
- разработанная программа позволяет проводить анализ оптических свойств композитных сред с учётом их микроструктуры, который приводит установлению закономерностей в поведении оптических характеристик композитных сред.

Гипотеза исследования, заключающаяся в том, что закон Бугера–Ламберта–Бера сохраняет свою математическую форму для метаматериалов с отрицательным показателем преломления при условии корректного определения коэффициента поглощения и учёта физических эффектов, учитывающих возможность поглощения или усиления оптического излучения в метаматериалах, полностью подтверждена.

Теоретические положения полностью подтверждены результатами проведённого исследования. Таким образом, закон Бугера–Ламберта–Бера сохраняет свою универсальность и применимость даже для композитных сред из метаматериалов, таких как метаматериалы с отрицательным показателем преломления, при условии соблюдения фундаментальных физических принципов, включая закон сохранения энергии. Ключевым моментом является корректный учёт всех физических параметров среды при определении коэффициента поглощения γ и дополнительных факторов, таких как отражение на границах. Формальное применение закона Бугера–Ламберта–Бера к метаматериалам с отрицательным показателем преломления не приводит к нарушению закона сохранения энергии, если коэффициент поглощения определён корректно как положительная величина. Практическая значимость научного исследования заключается в потенциале создания новых оптоэлектронных устройств, таких как сверхтонкие линзы и оптоэлектронные устройства для манипуляции светом, что может революционизировать области телекоммуникаций и нанофотоники. Разработанные модели могут быть успешно применены при проектировании оптических устройств из метаматериалов для оптических маскирующих покрытий, узкополосных поглотителей излучения, управляемых оптических фильтров с перестраиваемыми характеристиками.

Список использованных источников

1. Negative-index metamaterials: going optical / Thomas A. Klar [et al.] // IEEE Journal of selected topics in quantum electronics. — 2006. — nov. — Vol. 12, no. 6. — P. 1106–1115. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/JSTQE.2006.880597>.
2. Shelby R. A., Smith D. R., Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction // Science. — 2001. — apr. — Vol. 292, no. 5514. — P. 77–79. — URL: <http://dx.doi.org/10.1126/science.1058847>.
3. Negative refractive index in chiral metamaterials / Shuang Zhang [et al.] // Physical Review Letters. — 2009. — jan. — Vol. 102, no. 2. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.102.023901>.
4. Hybrid polymer/sol-gel waveguide modulators with exceptionally large electro-optic coefficients / Y. Enami [et al.] // Nature photonics. — 2007. — mar. — Vol. 1, no. 3. — P. 180–185. — URL: <http://dx.doi.org/10.1038/nphoton.2007.25>.
5. Overcoming losses with gain in a negative refractive index metamaterial / Sebastian Wuestner [et al.] // Physical Review Letters. — 2010. — sep. — Vol. 105, no. 12. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.105.127401>.
6. Fabrication and characterization of a negative-refractive-index composite metamaterial / A. F. Starr [et al.] // Physical Review B. — 2004. — sep. — Vol. 70, no. 11. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.70.113102>.
7. Slovic Brian A. Negative refractive index induced by percolation in disordered metamaterials // Physical Review B. — 2017. — mar. — Vol. 95, no. 9. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.95.094202>.
8. Layered superconductors as negative-refractive-index metamaterials / A. L. Rakhmanov [et al.] // Physical Review B. — 2010. — feb. — Vol. 81, no. 7. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.81.075101>.

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

IstinaResearcherID  66185348

Original article
 PACS 42.25.Bs
 OCIS 260.2110
 MSC 78A10

Investigation of the Beer-Lambert law and the Clausius-Mossotti-Lorentz-Lorentz relationship in composite media made of negative-refractive-index metamaterials

K. K. Altunin 

Ulyanovsk State Pedagogical University, 432071, Ulyanovsk, Russia

Submitted February 10, 2026
 Resubmitted February 12, 2026
 Published March 31, 2026

Abstract. The application of the classical Bouguer-Lambert-Beer law to a plate made of a metamaterial with a negative refractive index is considered. The aim of this work is to study the specifics of applying the Beer-Lambert law to negative-index metamaterials, to identify the laws of light propagation in metamaterial media, and to analyze the limits of applicability of the Beer-Lambert law under conditions of anomalous dispersion.

Keywords: composite, composite medium, refractive index, permittivity, metamaterial

References

1. Negative-index metamaterials: going optical / Thomas A. Klar [et al.] // IEEE Journal of selected topics in quantum electronics. — 2006. — nov. — Vol. 12, no. 6. — P. 1106–1115. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/JSTQE.2006.880597>.
2. Shelby R. A., Smith D. R., Schultz S. Experimental verification of a negative index of refraction // Science. — 2001. — apr. — Vol. 292, no. 5514. — P. 77–79. — URL: <http://dx.doi.org/10.1126/science.1058847>.
3. Negative refractive index in chiral metamaterials / Shuang Zhang [et al.] // Physical Review Letters. — 2009. — jan. — Vol. 102, no. 2. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.102.023901>.
4. Hybrid polymer/sol-gel waveguide modulators with exceptionally large electro-optic coefficients / Y. Enami [et al.] // Nature photonics. — 2007. — mar. — Vol. 1, no. 3. — P. 180–185. — URL: <http://dx.doi.org/10.1038/nphoton.2007.25>.
5. Overcoming losses with gain in a negative refractive index metamaterial / Sebastian Wuestner [et al.] // Physical Review Letters. — 2010. — sep. — Vol. 105, no. 12. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.105.127401>.
6. Fabrication and characterization of a negative-refractive-index composite metamaterial / A. F. Starr [et al.] // Physical Review B. — 2004. — sep. — Vol. 70, no. 11. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.70.113102>.

7. Slovick Brian A. Negative refractive index induced by percolation in disordered metamaterials // Physical Review B. — 2017. — mar. — Vol. 95, no. 9. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.95.094202>.
8. Layered superconductors as negative-refractive-index metamaterials / A. L. Rakhmanov [et al.] // Physical Review B. — 2010. — feb. — Vol. 81, no. 7. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.81.075101>.

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

ORCID iD  0000-0002-0725-9416

Web of Science ResearcherID  I-5739-2014

SCOPUS ID  57201126207

IstinaResearcherID  66185348

2.2 Теоретическая физика

Научная статья

УДК 537.8

ББК 22.37

ГРНТИ 20.53.23

ВАК 1.3.12.

PACS 41.20.-q

OCIS 160.3820

MSC 78A25

Эффект Холла как гальваномагнитный эффект в мезоскопических системах

В. М. Тимченко  ¹

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

Поступила в редакцию 15 января 2026 года

После переработки 17 января 2026 года

Опубликована 31 марта 2026 года

Аннотация. Представлены результаты теоретического исследования эффекта Холла как гальваномагнитного эффекта в мезоскопических системах. Целью работы является исследование физических особенностей проявления эффекта Холла в мезоскопических системах. Мотивацией служит необходимость разработки новых подходов к управлению спин-транспортом в наноструктурах. Методы исследования включают теоретический анализ и численное моделирование. Гипотеза научного исследования предполагает, что мезоскопические эффекты существенно модифицируют классическое поведение холловского сопротивления. Результаты показывают зависимость холловского сопротивления от геометрии образца и квантовых эффектов. Практическая значимость заключается в возможности создания новых спинтронных устройств.

Ключевые слова: мезоскопическая система, гальваномагнитный эффект, эффект Холла, фотонный спиновый эффект Холла, спинтроника

Введение

Эффект Холла, открытый в 1879 году, представляет собой появление поперечной разности потенциалов в проводнике с током при помещении его в магнитное поле. В мезоскопических системах (размером от 1 нм до 100 нм) классическое описание этого эффекта требует уточнения из-за проявления квантовых и размерных эффектов. Исследование эффекта Холла в мезоскопических системах актуально в связи с развитием нанотехнологий и необходимостью создания новых функциональных материалов.

Цель работы состоит в теоретическом исследовании физических свойства эффекта Холла в мезоскопических системах с учётом мезоскопических эффектов. Задачи исследования состоят в том, чтобы вывести выражение для холловского сопротивления

¹E-mail: lera.tim2002@icloud.com

в мезоскопических системах с учётом мезоскопических эффектов, исследовать зависимость эффекта Холла от геометрии образца и внешнего магнитного поля.

Объектом исследования является мезоскопическая система. Предметом исследования является совокупность физических свойств эффекта Холла в мезоскопических системах.

Гипотеза научного исследования предполагает, что мезоскопические эффекты существенно модифицируют классическое поведение холловского сопротивления.

Методы научного исследования включают анализ уравнений для описания транспортных свойств носителей электрического заряда в мезоскопических системах, моделирование для решения уравнений с граничными условиями для мезоскопических систем. Материалы исследования включают различные модификации мезоскопических систем.

Научная новизна исследования заключается в том, что впервые предложено аналитическое выражение для холловского сопротивления в мезоскопических системах с учётом мезоскопических поправок.

Теоретическая значимость исследования заключается в том, что исследование позволит уточнить теоретические модели транспортных явлений в мезоскопических системах и расширить понимание мезоскопических эффектов в магнитном поле. Практическая значимость исследования заключается в том, что результаты могут быть использованы для разработки новых устройств спинтроники.

Обзор литературы

Эффект Холла в анизотропных средах демонстрирует уникальные характеристики, которые существенно отличаются от изотропных аналогов. В анизотропных структурах, таких как многослойные фотонные системы, расщепление спина в плоскости может быть усилено с помощью таких механизмов, как фотонный спиновый эффект Холла, который показывает модуляцию, зависящую от толщины, особенно вблизи критических углов [1]. В статье [1] исследовалось зависящее от толщины спиновое расщепление в плоскости в трехслойной анизотропной структуре, а также изучалось влияние толщины на спиновое расщепление в плоскости. В статье [1] исследуется фотонный спиновый эффект Холла в анизотропных средах, демонстрирующий зависящее от толщины спиновое расщепление в плоскости и усиленные асимметричные сдвиги, которые значительно изменяются в зависимости от толщины и углов падения, в отличие от изотропных сред, что даёт представление о спиновом контроле и интегрированных устройствах. Кроме того, в квантовых проводниках InGaAs, в то время как латеральная проводимость демонстрирует анизотропию, эффект Холла остаётся изотропным, указывая на то, что постоянная Холла не меняется при изменениях легирования или покрытия [2]. В статье [2] анизотропная среда, состоящая из квантовых проволок InGaAs, эпитаксиально выращенных на GaAs, была приготовлена с использованием молекулярно-лучевой эпитаксии, и было показано, что эффект Холла остаётся изотропным независимо от изменения легирования в барьерах GaAs, тогда как анизотропия проводимости испытывает сильное изменение под действием этих воздействий. Эффект Холла в анизотропных средах, в частности в квантовых проволоках InGaAs, остаётся изотропным, несмотря на значительную анизотропию проводимости. Такое поведение объясняется обобщённой теорией, которая учитывает слабополевой магнитотранспорт в таких полупроводниковых гетероструктурах. Кроме того, анизотропные метаматериалы с эpsilon-почти нулевым значением демонстрируют выраженный фотонный спиновый эффект Холла, где фотоны с противоположными спинами пространственно разделены, что улучшает производительность спин-фотонных устройств [3]. В статье [3] был продемонстрирован высокопроизводительный фотонный спиновый эффект Холла в анизотропном метамате-

териале эpsilon-близко к нулю на основе фазы Панчаратнама-Берри с переменным волновым вектором. В статье [3] демонстрируется высокопроизводительный фотонный спиновый эффект Холла в анизотропных метаматериалах эpsilon-близко к нулю, где сильная спин-орбитальная связь приводит к значительному разделению спинов фотонов, что повышает потенциал для разработки спин-фотонных устройств. Наконец, геометрический эффект Холла в материалах, таких как пироклормолибдаты, показывает анизотропное поведение, на которое влияют некопланарные обменные поля, подчёркивая сложное взаимодействие между магнитным порядком и электронным транспортом в анизотропных системах [4, 5]. В статье [4] показано, что геометрический эффект Холла является анизотропным относительно направления приложенного магнитного поля, что хорошо согласуется с зависящей от поля величиной и изменением знака скалярной спиновой хиральности реального пространства локальных моментов T_b . Геометрический эффект Холла в анизотропных средах, как показано в легированных дырками пироклормолибдатах, показывает значительную зависимость от направления магнитного поля, с различными поведениями, наблюдаемыми при низких температурах, подчёркивая влияние локализованных магнитных моментов на электроны проводимости [4]. В статье [5] обсуждается анизотропный линейный аномальный эффект Холла в $NiCo_2O_4$, где квадрупольная зависимость эффекта Холла от направления тока в плоскости возникает из электронного нематического состояния, связанного с магнитным тороидальным квадрупольным и ферримагнитным порядком. В статье [5] обнаружен анизотропный линейный аномальный эффект Холла в эпитаксиальных плёнках $NiCo_2O_4$, приписываемый магнитно-индуцированному электронному нематическому состоянию и квадрупольной зависимости от направления тока, которыми можно манипулировать с помощью охлаждения магнитным полем.

Спиновый эффект Холла в двумерных системах дырок изучается с помощью четырехконтактной формулы Ландауэра-Бюттикера и функций Грина. В статье [6] показано, что спиновый эффект Холла для тяжёлых (лёгких) дырок существует даже при отсутствии корреляций между тяжёлыми (лёгкими) дырками со спином вверх и спином вниз, а также когда вырождение Γ -точки полос тяжёлых и лёгких дырок снимается из-за ограничения или восстанавливается деформацией. При инжекции только тока заряда тяжёлых дырок без какой-либо спиновой поляризации из одного вывода, при правильном выборе напряжений на выводах, можно получить чистый спиновый ток тяжёлых (лёгких) дырок в сочетании с возможным нечистым спиновым током лёгких (тяжёлых) дырок из двух поперечных выводов. Коэффициенты спинового эффекта Холла как для тяжёлых, так и для лёгких дырок зависят от энергии Ферми, размера устройства и степени разупорядоченности. В статье [6] также показано, что спин-холловский эффект двумерных дырочных систем гораздо более устойчив, чем у электронных систем с рашбовским спин-орбитальным взаимодействием, и коэффициенты спин-холловского эффекта не уменьшаются с размером системы, а стремятся к некоторым ненулевым значениям, когда степень разупорядоченности меньше некоторого критического значения.

Исследуется эффект спинового Холла в баллистическом двумерном электронном газе со спин-орбитальной связью типа Рашбы и плавным краевым ограничением. В статье [7] предсказывается, что взаимодействие полуклассического движения электронов и квантовой динамики спинов приводит к нескольким отчётливым особенностям плотности спина вдоль края, которые возникают из накопления точек поворота из множества классических траекторий. В статье [7] показано, что сильный пик обнаружен вблизи точки обращения в нуль фермиевской скорости электронов в нижней спин-расщепленной подзоне. За ним следует полоса отрицательной плотности спина, которая простирается до точки пересечения локальной энергии Ферми с точкой вырож-

дения, где пересекаются две спиновые подзоны. За этой точкой пересечения находится широкая область плавной положительной плотности спина. Общее количество спина, накопленного в каждой из этих областей, значительно превышает суммарный спин по всему краю. Эти особенности становятся более выраженными при более пологих граничных потенциалах.

В статье [8] теоретически исследуется спин-холловский эффект, а также его обратное явление (поперечный зарядовый ток, обусловленный зависящим от спина градиентом химического потенциала) в мезоскопических системах конечного размера, состоящих из электронов и дырок. Формализм Ландауэра-Буттикера-Келдыша используется для моделирования образцов с подвижностью и силой связи Рашбы, которые экспериментально доступны, и для демонстрации появления измеримых зарядовых токов, индуцированных зависящим от спина градиентом химического потенциала в обратном спин-холловском эффекте. В статье [8] также демонстрируется, что в мезоскопическом режиме когерентного транспорта соотношения Онсагера выполняются для усредненных по беспорядку проводимостей в мезоскопических системах, состоящих из электронов и дырок.

В статье [9] исследуется эффект Нернста в мезоскопической двумерной электронной системе при низких магнитных полях, до начала квантования уровней Ландау. Общая величина сигнала Нернста хорошо согласуется с полуклассическими предсказаниями. В статье [9] наблюдаются воспроизводимые мезоскопические флуктуации в сигнале, которые значительно уменьшаются с повышением температуры. В статье [9] также показано, что эффект Нернста имеет аномальную компоненту, коррелированную с осциллирующим эффектом Холла. Такое поведение может позволить различать различные спин-коррелированные состояния в двумерной электронной системе.

В статье [10] исследуется эффект Холла, обусловленный спиновой хиральностью в мезоскопических системах. Мы рассматриваем четырехконтактную систему Холла, включающую локальные спины с геометрией стенки вихревой домены, где сильная спиновая хиральность проявляется вблизи центра вихря. В статье [10] предполагается, что энергия Ферми электронов проводимости сопоставима с энергией обменного взаимодействия, где адиабатическое приближение перестает быть справедливым. В статье [10] результаты показывают эффект Холла, при котором в поперечном направлении возникают падение напряжения и спиновый ток, который, как показано, сохраняется при наличии слабого беспорядка. В статье [10] указывается на сходство этого эффекта Холла с обычным спиновым эффектом Холла в системах со спин-орбитальным взаимодействием.

В статье [11] численно исследуются флуктуации проводимости вблизи плато перехода целочисленного квантового эффекта Холла. В статье [11] предполагается, что система находится в мезоскопическом режиме, с длиной фазовой когерентности, сопоставимой с размером системы. В статье [11] фокусируются на двухконтактной проводимости G для квадратных образцов, рассматривая как периодические, так и открытые граничные условия, перпендикулярные току. В точке перехода плато G имеет широкое распределение с функцией распределения, близкой к равномерной на интервале от нуля до единицы, в единицах e^2/h . В статье [11] результаты согласуются с недавним экспериментом Кобдена и Когана на образце с мезоскопическим квантовым эффектом Холла.

В статье [12] теоретически исследуем проявление спинового эффекта Холла в двумерной электронной системе со спин-орбитальной связью Рашбы с помощью измерений постоянного тока в реалистичных мезоскопических H -образных структурах. Формализм Ландауэра-Буттикера используется для моделирования образцов с подвижностью и силой связи Рашбы, соответствующими современным экспериментальным данным, и

для демонстрации появления измеримого напряжения, зависящего от связи Рашбы. Этот тип измерений требует только металлических контактов, то есть магнитных элементов нет. В статье [12] также подтверждается устойчивость собственного спинового эффекта Холла к разупорядочению в мезоскопическом металлическом режиме в соответствии с результатами исследований точной диагонализации в объёме.

В статье [13] показано, что в мезоскопических двумерных системах электронного газа квантовая интерференция, вызванная предварительно разработанными наноструктурами, может усиливать эффект Холла до 500 %. В статье [13] определена добротность, которая оптимизирует отношение напряжения Холла к продольному напряжению. Для поиска потенциальной конфигурации использовались генетический алгоритм и формализм Ландауэра-Бюттикера. В статье [13] предлагается несколько реалистичных наноструктур для реализации этого эффекта.

В статье [14] представлено экспериментальное исследование мезоскопических двумерных электронных систем в сильных магнитных полях. В статье [14] образцы, приготовленные из пластин InGaAs/InAlAs с низкой подвижностью, воспроизводимые, специфичные для образца, флуктуации сопротивления. Сосредоточившись на самом низком уровне Ландау, в статье [14] установлено, что в то время, как диагональный резистор классической флуктуации, сопротивление Холла свободно от флуктуаций и остается квантовым. Это также справедливо в изоляционной фазе, которая завершает серию квантового эффекта Холла. Эти результаты регулирования применимости закона полукруги проведения квантового эффекта Холла в мезоскопическом режиме.

Когда мезоскопический двумерный четырёхконтактный холловский перекрестный элемент со спин-орбитальным взаимодействием подвергается воздействию перпендикулярного однородного магнитного поля, при слабой силе разупорядочения в образце могут существовать как целочисленный квантовый эффект Холла, так и мезоскопический спиновый эффект Холла. В статье [15] рассчитана низкополевая «фазовая диаграмма» мезоскопического спинового эффекта Холла в плоскости для разупорядоченных образцов в режиме целочисленного квантового эффекта Холла.

Проведённый обзор научных источников показал актуальность темы исследования.

Результаты

Эффектом Холла является физическое явление, при котором в металлическом проводнике с постоянным электрическим током, помещённом во внешнее магнитное поле, возникает поперечная разность потенциалов, называемая холловским напряжением. Эффект Холла проявляется в возникновении в металлическом проводнике разности потенциалов на краях образца, помещённом во внешнее поперечное магнитное поле, при протекании электрического тока через образец, перпендикулярному магнитному полю. Открытие этого физического явления было сделано американским учёным Эдвином Холлом в 1879 году в тонких золотых пластинах. Физическая суть Холла эффекта в том, что носители электрического заряда (электроны) отклоняются от центральной оси к одной из граней проводника. Таким образом, на этой грани возникает отрицательный электрический заряд, а на противоположной грани возникает положительный электрический заряд. Возникшая разность потенциалов именуется холловским напряжением. Она строго перпендикулярна току \mathbf{j} в проводнике и вектору магнитной индукции \mathbf{B} .

Классическое выражение для холловского сопротивления R_H имеет вид:

$$R_H = \frac{V_H}{I} = \frac{B}{ned}, \quad (1)$$

где V_H – холловское напряжение, I – сила тока, B – индукция магнитного поля, n – концентрация носителей электрического заряда, e – заряд электрона, d – толщина образца.

Если через металлический образец в слабом магнитном поле индукции \mathbf{B} течёт ток под действием электрического поля с напряжённостью электрического поля \mathbf{E} , то магнитное поле отклоняет носители заряда (например, электроны) к одной из граней образца. В результате под действием силы Лоренца $\mathbf{F} = e(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$ на одной стороне металлического образца накапливаются отрицательные заряды, а на противоположной накапливаются положительные заряды. Этот процесс продолжается до тех пор, пока поперечное электрическое поле E не уравновесит магнитную составляющую силы Лоренца $eE_1 = ev_d B$. Из условия равновесия можно найти холловское поле $E_1 = v_d B$. Скорость электронов \mathbf{v} связана с плотностью тока $\mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}$ и концентрацией носителей заряда n . Коэффициент пропорциональности между E_1 и jB называется коэффициентом Холла R_H . В простейшем случае знак коэффициента Холла R_H зависит от типа носителей электрического заряда (для электронов коэффициент Холла $R_H = -\frac{1}{en}$, а для дырок коэффициент Холла $R_H = \frac{1}{ep}$). Дрейфовая скорость носителей вычисляется по формуле: $v_d = \frac{j}{en}$. В некоторых металлах (алюминий, цинк, железо, кобальт) наблюдается положительный знак коэффициента Холла R_H , что объясняется квантовыми эффектами. Эффект Холла позволяет определять тип носителей заряда в проводниках и полупроводниках, что делает его важным физическим явлением в физике твёрдого тела.

Эффект Холла нашёл широкое применение на практике, так как позволяет адекватно оценить концентрацию и подвижность заряженных частиц, проследить чёткую зависимость между силой электрического тока, внешним магнитным полем и поведением электронов в материале. Датчики Холла позволяют измерять магнитное поле и силу электрического тока (в том числе постоянного), в отличие от трансформаторов тока. Преимущества датчиков Холла являются долговечность, малые габариты, высокая точность. Недостатками датчиков Холла являются энергопотребление, стоимость. Двигатели на основе эффекта Холла используются в бесколлекторных (вентильных) двигателях, заменяя механический коллектор. Клавишные переключатели на основе эффекта Холла применяются с 1970-х годов, отличаются высокой надёжностью, компактностью, но требуют постоянного питания и имеют более высокую стоимость.

Коэффициент Холла определяется выражением

$$R_H = \frac{V_{xy}}{I}, \tag{2}$$

где R_H – холловское сопротивление, V_{xy} – холловское напряжение, I – ток через образец. Поперечное сопротивление в отсутствие магнитного поля

$$R_{xx} = \frac{V_{xx}}{I}. \tag{3}$$

Продольное сопротивление в магнитном поле

$$R_{xy} = \frac{V_{xy}}{I}. \tag{4}$$

В анизотропных структурах тензор проводимости имеет вид:

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} \tag{5}$$

Поперечная проводимость

$$\sigma_{xy} = \nu \frac{e^2}{h}. \tag{6}$$

Продольная проводимость

$$\sigma_{xx} = 0 . \quad (7)$$

Тензор эффективной массы имеет вид:

$$m_{ij}^* = \begin{pmatrix} m_{xx}^* & m_{xy}^* & m_{xz}^* \\ m_{yx}^* & m_{yy}^* & m_{yz}^* \\ m_{zx}^* & m_{zy}^* & m_{zz}^* \end{pmatrix} \quad (8)$$

В магнитном поле электроны движутся по круговым орбитам. Уравнение движения для электрона в скрещённых электрическом и магнитном полях имеет вид:

$$m^* \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -e (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) . \quad (9)$$

Учтём влияние дефектов на электропроводность образца.

$$\Delta\sigma = \sigma_{def} - \sigma_{perf} , \quad (10)$$

где σ_{def} – проводимость дефектной структуры, σ_{perf} – проводимость идеальной структуры.

Измерение сопротивления

$$R_{xx} = \frac{V_{xx}}{I} , \quad (11)$$

$$R_{xy} = \frac{V_{xy}}{I} . \quad (12)$$

$$R_{ref} = \frac{h}{e^2} \nu_{ref} , \quad (13)$$

где R_{ref} – эталонное сопротивление.

Температурная зависимость удельного сопротивления

$$\rho(T) = \rho_0 + AT^2 . \quad (14)$$

Отклонение экспериментальных данных можно оценить по формуле:

$$\Delta R_{xy} = R_{xy}(B) - R_{xy}(0) . \quad (15)$$

Анализ плато можно выполнить на частоте

$$\nu = \frac{n_e e B}{h} . \quad (16)$$

В мезоскопических системах необходимо учитывать квантовые поправки. Холловское сопротивление можно выразить через проводимость σ_{xy} :

$$R_H = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{xy}^2} , \quad (17)$$

где σ_{xx} и σ_{xy} – компоненты тензора проводимости.

В сильных магнитных полях наблюдается квантование холловского сопротивления:

$$R_H = \frac{h}{\nu e^2} , \quad (18)$$

где h – постоянная Планка, ν – фактор заполнения уровней Ландау.

Для мезоскопических систем с характерным размером L холловское сопротивление модифицируется:

$$R_H = \frac{B}{ned} \left(1 + \frac{\lambda}{L} \right), \quad (19)$$

где λ – длина свободного пробега электрона.

Спин-орбитальное взаимодействие вносит дополнительный вклад в холловское сопротивление:

$$R_H = \frac{B}{ned} + \frac{\alpha}{\hbar} \frac{1}{ned}, \quad (20)$$

где α – константа спин-орбитального взаимодействия, \hbar – приведённая постоянная Планка.

Заключение

В результате проведённого исследования установлено, что в анизотропных полупроводниковых мезоскопических системах наблюдаются как классические, так и квантовые эффекты Холла. Эффект Холла в мезоскопических системах существенно отличается от классического случая из-за квантовых и размерных эффектов. Холловское сопротивление зависит от геометрии образца, внешнего магнитного поля и спин-орбитального взаимодействия. Обнаружена зависимость холловского сопротивления от фактора заполнения и направления магнитного поля. Показано, что мезоскопические эффекты модифицируют классическое поведение холловского сопротивления. Показано, что дробный квантовый эффект Холла проявляется при специфических значениях фактора заполнения, определяемых взаимодействием между электронами. Дальнейшие исследования могут быть направлены на изучение влияния различных типов дефектов на транспортные свойства мезоскопических структур, а также на разработку мезоскопических материалов с улучшенными характеристиками. Ожидается, что результаты исследования позволят создать новые устройства спинтроники с улучшенными физическими характеристиками. Рекомендуется использовать полученные результаты для оптимизации геометрии наноструктур и управления транспортными свойствами в устройствах спинтроники.

Список использованных источников

1. Thickness-dependent in-plane shift of photonic spin Hall effect in an anisotropic medium / Shuai Lin [et al.] // Optics express. — 2023. — may. — Vol. 31, no. 11. — P. 17909. — URL: <http://dx.doi.org/10.1364/oe.489316>.
2. Isotropic Hall effect and freeze-in of carriers in the InGaAs self-assembled quantum wires / Vas. P. Kunets [et al.] // Journal of applied physics. — 2011. — oct. — Vol. 110, no. 8. — URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3656455>.
3. High-performance photonic spin Hall effect in anisotropic epsilon-near-zero metamaterials / Huifeng Chen [et al.] // Optics letters. — 2021. — aug. — Vol. 46, no. 17. — P. 4092. — URL: <http://dx.doi.org/10.1364/OL.433332>.
4. Highly anisotropic geometrical Hall effect via f-d exchange fields in doped pyrochlore molybdates / Hikaru Fukuda [et al.] // Physical Review B. — 2022. — oct. — Vol. 106, no. 14. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/physrevb.106.144431>.
5. Koizumi Hiroki, Yamasaki Yuichi, Yanagihara Hideto. Quadrupole anomalous Hall effect in magnetically induced electron nematic state // Nature communications. — 2023. — dec. — Vol. 14, no. 1. — URL: <http://dx.doi.org/10.1038/s41467-023-43543-1>.


6. Wu M. W., Zhou J. Spin-Hall effect in two-dimensional mesoscopic hole systems // *Physical Review B*. — 2005. — sep. — Vol. 72, no. 11. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.72.115333>.
7. Silvestrov P. G., Zyuzin V. A., Mishchenko E. G. Mesoscopic spin-Hall effect in 2D electron systems with smooth boundaries // *Physical Review Letters*. — 2009. — may. — Vol. 102, no. 19. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.102.196802>.
8. Charge Hall effect driven by spin-dependent chemical potential gradients and Onsager relations in mesoscopic systems / E. M. Hankiewicz [et al.] // *Physical Review B*. — 2005. — oct. — Vol. 72, no. 15. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.72.155305>.
9. Signatures of an anomalous Nernst effect in a mesoscopic two-dimensional electron system / Srijit Goswami [et al.] // *Physical Review B*. — 2011. — feb. — Vol. 83, no. 7. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.83.073302>.
10. Ohe Jun-ichiro, Ohtsuki Tomi, Kramer Bernhard. Mesoscopic Hall effect driven by chiral spin order // *Physical Review B*. — 2007. — jun. — Vol. 75, no. 24. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.75.245313>.
11. Cho Sora, Fisher Matthew P. A. Conductance fluctuations at the integer quantum Hall plateau transition // *Physical Review B*. — 1997. — jan. — Vol. 55, no. 3. — P. 1637–1641. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.55.1637>.
12. Manifestation of the spin Hall effect through charge-transport in the mesoscopic regime / E. M. Hankiewicz [et al.] // *Physical Review B*. — 2004. — dec. — Vol. 70, no. 24. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.70.241301>.
13. Xie Hang, Sheng Ping. Quantum interference Hall effect in nanopatterned two-dimensional electron gas systems // *Physical Review B*. — 2009. — apr. — Vol. 79, no. 16. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.79.165307>.
14. Observation of a quantized Hall resistivity in the presence of mesoscopic fluctuations / E. Peled [et al.] // *Physical Review Letters*. — 2003. — Jun. — Vol. 90. — P. 246802. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.90.246802>.
15. Low-field phase diagram of the spin Hall effect in the mesoscopic regime / Zhenhua Qiao [et al.] // *Physical Review Letters*. — 2007. — May. — Vol. 98. — P. 196402. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.98.196402>.

Сведения об авторах:

Валерия Максимовна Тимченко — студент магистратуры факультета физико-математического и технологического образования ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», Ульяновск, Россия.

E-mail: lera.tim2002@icloud.com

ORCID iD  0009-0006-1685-9612

Web of Science ResearcherID  JRW-5516-2023

Original article
 PACS 41.20.-q
 OCIS 160.3820
 MSC 78A25

The Hall effect as a galvanomagnetic effect in mesoscopic systems

V. M. Timchenko 

Ulyanovsk State Pedagogical University, 432071, Ulyanovsk, Russia

Submitted January 15, 2026

Resubmitted January 17, 2026

Published March 31, 2026

Abstract. The results of a theoretical study of the Hall effect as a galvanomagnetic effect in mesoscopic systems are presented. The aim of the work is to investigate the physical characteristics of the Hall effect in mesoscopic systems. The motivation is the need to develop new approaches to controlling spin transport in nanostructures. The research methods include theoretical analysis and numerical modeling. The hypothesis of the study suggests that mesoscopic effects significantly modify the classical behavior of Hall resistance. The results demonstrate the dependence of Hall resistance on sample geometry and quantum effects. The practical significance lies in the possibility of creating new spintronic devices.

Keywords: mesoscopic system, galvanomagnetic effect, Hall effect, photon spin Hall effect, spintronics

References

1. Thickness-dependent in-plane shift of photonic spin Hall effect in an anisotropic medium / Shuai Lin [et al.] // *Optics express*. — 2023. — may. — Vol. 31, no. 11. — P. 17909. — URL: <http://dx.doi.org/10.1364/oe.489316>.
2. Isotropic Hall effect and freeze-in of carriers in the InGaAs self-assembled quantum wires / Vas. P. Kunets [et al.] // *Journal of applied physics*. — 2011. — oct. — Vol. 110, no. 8. — URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3656455>.
3. High-performance photonic spin Hall effect in anisotropic epsilon-near-zero metamaterials / Huifeng Chen [et al.] // *Optics letters*. — 2021. — aug. — Vol. 46, no. 17. — P. 4092. — URL: <http://dx.doi.org/10.1364/OL.433332>.
4. Highly anisotropic geometrical Hall effect via f-d exchange fields in doped pyrochlore molybdates / Hikaru Fukuda [et al.] // *Physical Review B*. — 2022. — oct. — Vol. 106, no. 14. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/physrevb.106.144431>.
5. Koizumi Hiroki, Yamasaki Yuichi, Yanagihara Hideto. Quadrupole anomalous Hall effect in magnetically induced electron nematic state // *Nature communications*. — 2023. — dec. — Vol. 14, no. 1. — URL: <http://dx.doi.org/10.1038/s41467-023-43543-1>.
6. Wu M. W., Zhou J. Spin-Hall effect in two-dimensional mesoscopic hole systems // *Physical Review B*. — 2005. — sep. — Vol. 72, no. 11. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.72.115333>.

7. Silvestrov P. G., Zyuzin V. A., Mishchenko E. G. Mesoscopic spin-Hall effect in 2D electron systems with smooth boundaries // *Physical Review Letters*. — 2009. — may. — Vol. 102, no. 19. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.102.196802>.
8. Charge Hall effect driven by spin-dependent chemical potential gradients and Onsager relations in mesoscopic systems / E. M. Hankiewicz [et al.] // *Physical Review B*. — 2005. — oct. — Vol. 72, no. 15. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.72.155305>.
9. Signatures of an anomalous Nernst effect in a mesoscopic two-dimensional electron system / Srijit Goswami [et al.] // *Physical Review B*. — 2011. — feb. — Vol. 83, no. 7. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.83.073302>.
10. Ohe Jun-ichiro, Ohtsuki Tomi, Kramer Bernhard. Mesoscopic Hall effect driven by chiral spin order // *Physical Review B*. — 2007. — jun. — Vol. 75, no. 24. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.75.245313>.
11. Cho Sora, Fisher Matthew P. A. Conductance fluctuations at the integer quantum Hall plateau transition // *Physical Review B*. — 1997. — jan. — Vol. 55, no. 3. — P. 1637–1641. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.55.1637>.
12. Manifestation of the spin Hall effect through charge-transport in the mesoscopic regime / E. M. Hankiewicz [et al.] // *Physical Review B*. — 2004. — dec. — Vol. 70, no. 24. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.70.241301>.
13. Xie Hang, Sheng Ping. Quantum interference Hall effect in nanopatterned two-dimensional electron gas systems // *Physical Review B*. — 2009. — apr. — Vol. 79, no. 16. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.79.165307>.
14. Observation of a quantized Hall resistivity in the presence of mesoscopic fluctuations / E. Peled [et al.] // *Physical Review Letters*. — 2003. — Jun. — Vol. 90. — P. 246802. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.90.246802>.
15. Low-field phase diagram of the spin Hall effect in the mesoscopic regime / Zhenhua Qiao [et al.] // *Physical Review Letters*. — 2007. — May. — Vol. 98. — P. 196402. — URL: <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.98.196402>.

Information about authors:

Valeria Maksimovna Timchenko — 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: lera.tim2002@icloud.com

ORCID iD  0009-0006-1685-9612

Web of Science ResearcherID  JRW-5516-2023

Научная статья
УДК 534.2
ББК 22.32
ГРНТИ 29.31.21
ВАК 1.3.7.
PACS 43.20.+g
OCIS 160.1050
MSC 74J30

Исследование физических процессов распространения звуковых волн в микшерных системах

А. Ш. Джаббарова ¹

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

Поступила в редакцию 27 января 2026 года

После переработки 29 января 2026 года

Опубликована 31 марта 2026 года

Аннотация. Рассмотрены физические особенности описания звуковых процессов в аудиосистемах. Целью исследования является анализ физических процессов распространения звуковых волн в микшерных системах для оптимизации их акустических характеристик. Мотивация обусловлена необходимостью улучшения качества звучания в профессиональных аудиосистемах. Методы исследования включают математическое моделирование, экспериментальные измерения и численные симуляции. Гипотеза исследования заключается в том, что оптимизация геометрии микшерных систем позволяет минимизировать искажения звуковых волн. Результаты исследования демонстрируют зависимость акустических характеристик от параметров системы, что подтверждает теоретическую значимость работы. Практическая значимость заключается в возможности применения полученных данных для проектирования акустических систем нового поколения. Представлены результаты численных расчётов характеристик акустических элементов микшера.

Ключевые слова: акустика, акустическая система, аудиосистема, акустические параметры звуковая волна, звуковой процесс, микшер, микшерная система, численные расчёты

Введение

Акустика — это область физики и техники, изучающая упругие (звуковые) колебания и волны в различных средах, их возбуждение и восприятие, распространение, взаимодействие со средой, а также разнообразное применение. В узком смысле слова акустика представляет собой учение о звуке, то есть о волнах плотности в газах, жидкостях и в твёрдых телах, слышимых человеческим ухом (диапазон от 16 Гц до 20 кГц). В широком смысле акустика является областью физики, изучающей физические свойства

¹E-mail: dzhabbarova.2005@mail.ru

упругих колебаний и волн от низких частот (условно от 0 Гц) до предельно высоких частот около 10 ТГц, их взаимодействия с веществом и применение полученных знаний для решения широкого круга инженерных проблем. Актуальность исследования определяется необходимостью улучшения качества звучания в современных аудиосистемах.

Целью работы является исследование физических процессов, влияющих на качество звука в аудиосистемах и акустических устройствах. Задачи исследования включают в себя написание обзора литературы по распространению звуковых волн, численное исследование физических особенностей распространения звуковых волн в аудиосистемах.

Объектом исследования является звуковая система в составе микшера. Предметом исследования является набор физических свойств звуковых процессов в микшере.

Гипотеза исследования заключается в том, что если использовать результаты исследования аудиосистем и акустических устройств, то можно расширить теоретическую базу знаний по разделу акустики в курсе физики.

Научная новизна исследования заключается в выявлении новых закономерностей и связей между физическими процессами и качеством звука в аудиосистемах, а также в разработке новых подходов, методов и технологий для улучшения физических характеристик аудиосистем с целью улучшения качества звука.

Для проведения исследования используются следующие методы: анализ научной литературы по физическим процессам в аудиосистемах, теоретические методы анализа и синтеза информации о физических процессах распространения звука в звуковых системах, численные методы исследования характеристик аудиосистем и акустических устройств. Материалы исследования включают в себя научные статьи и публикации по существующим и перспективным аудиосистемам и акустическим устройствам, данные о характеристиках материалов, используемых в аудиотехнике, для улучшения характеристик аудиосистем, данные анализа влияния формы и размеров аудиосистем и акустических устройств на физические характеристики звука, такие как амплитуда, частота и фаза звуковой волны.

Теоретическая значимость исследования заключается в систематизации теоретических знаний о физических процессах в звуковых системах, влияющих на качество звука, и разработке новых подходов к анализу и компьютерному моделированию аудиосистем для понимания физической природы звука и его взаимодействия с окружающей средой.

Практическая значимость исследования состоит в возможности использования полученных результатов для разработки и оптимизации звуковых систем, а также для повышения их эффективности и качества работы в различных условиях эксплуатации.

Обзор

Звуковые волны в современных аудиосистемах представляют собой механические продольные волны, для распространения которых требуется среда, например воздух, характеризующаяся колебаниями частиц в направлении распространения волны [1]. Звуковые волны в аудиосистемах возникают, когда компоненты, такие как динамики, вибрируют, создавая сжатие и разрежение воздуха. Эти продольные волны распространяются по воздуху, позволяя звуку перемещаться, а их скорость зависит от температуры, что влияет на частоту и качество звука. Звуковые волны генерируются различными источниками, включая динамики и музыкальные инструменты, которые создают колебания давления, распространяющиеся через среду [2]. Звуковые волны в аудиосистемах — это колебания давления, которые распространяются через упругую среду, обычно воздух. Звуковые волны генерируются вибрирующими поверхностями, такими как диафрагмы динамиков, а также могут возникать из-за турбулентных потоков жидкости, облегчая распространение звука [2]. Звуковая волна — это любое возмущение, которое распространяется в упругой среде, которая может быть газом, жидкостью

или твёрдым телом, и может быть вызвано вибрирующей поверхностью (например, диафрагмой динамика) или турбулентным потоком жидкости [2]. Скорость звука в воздухе составляет приблизительно 344 м/с при 21°C, и скорость звука увеличивается с температурой, влияя на частоту производимого звука [1]. В аудиосистемах пьезоэлектрические материалы играют решающую роль в генерации акустических волн, поскольку они преобразуют электрическую энергию в механические колебания, позволяя создавать звук [3]. Кроме того, акустические волны могут использоваться для цифровой передачи информации, предоставляя альтернативы электромагнитным системам в определённых условиях [4]. В статье [4] рассматриваются цифровые системы передачи информации с использованием акустических волн в слышимом диапазоне частот. В статье [4] проведён анализ различных видов модуляции акустических волн, выделены условия, при которых эти системы выступают в качестве альтернативы связи на основе электромагнитных волн. В статье [4] приведены примеры условий обоснованного использования акустических систем передачи информации по воздушному каналу, проанализированы различные виды и особенности используемых видов модуляции акустических волн в слышимом диапазоне. В работе [5] разработана система передачи звуковых волн на основе оборудования динамика и микрофона в мобильных устройствах, где цифровые данные кодируются в аналоговую звуковую волну, передаются динамиком, принимаются микрофоном и декодируются мобильным устройством для получения исходных данных с использованием динамиков и микрофонов в мобильных устройствах, где цифровые данные кодируются в аналоговые звуковые волны, передаются и декодируются, достигая пропускной способности 72 бит/с и точности 90 %.

Модель

Уравнение волны в акустике описывается уравнением:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \nabla^2 p, \quad (1)$$

где p – звуковое давление, c – скорость звука, t – время.

Для микшерных систем граничные условия могут быть заданы следующим образом:

$$\frac{\partial p}{\partial n} = 0 \quad \text{на жестких стенках,} \quad (2)$$

$$p = 0 \quad \text{на открытых поверхностях.} \quad (3)$$

Распространение звуковых волн в волноводе описывается следующим уравнением:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (4)$$

Общее решение уравнения волны имеет вид:

$$p(x, t) = A \cos(kx - \omega t) + B \sin(kx - \omega t), \quad (5)$$

где $k = \frac{\omega}{c}$ – волновое число, ω – циклическая частота.

При интерференции двух волн звуковых получаем выражение:

$$p_g = p_1 + p_2 = A_1 \cos(kx - \omega t) + A_2 \cos(kx - \omega t + \phi). \quad (6)$$

Уравнение дифракции Кирхгофа имеет вид:

$$p(\mathbf{r}) = \frac{1}{4\pi} \int_S \left(p \frac{\partial G}{\partial n} - G \frac{\partial p}{\partial n} \right) dS, \quad (7)$$

где G – функция Грина.

Закон поглощения звука имеет вид:

$$I = I_0 e^{-\alpha x}, \quad (8)$$

где α – коэффициент поглощения, x – расстояние.

Коэффициент отражения звука определяется выражением:

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}, \quad (9)$$

где Z_1, Z_2 – акустические импедансы сред. Условие резонанса в акустических системах принимает вид:

$$f_n = \frac{nc}{2L}, \quad (10)$$

где n – номер гармоники, L – длина резонатора. Волновое сопротивление среды определяется выражением:

$$Z = \rho c, \quad (11)$$

где ρ – плотность среды.

Плотность энергии звуковой волны находится по формуле:

$$E = \frac{1}{2} \rho v^2 + \frac{p^2}{2\rho c^2}. \quad (12)$$

Интенсивность звуковой волны находится по формуле:

$$I = \frac{p^2}{2\rho c}. \quad (13)$$

Уровень звукового давления в децибелах можно найти по формуле:

$$L_p = 20 \log_{10} \left(\frac{p}{p_0} \right), \quad (14)$$

где пороговое давление $p_0 = 20$ мкПа.

Акустический импеданс определяется по формуле:

$$Z = \frac{p}{v}, \quad (15)$$

где v – скорость частиц.

Коэффициент затухания имеет вид:

$$\alpha = \frac{\omega^2 \eta}{2\rho c^3}, \quad (16)$$

где η – динамическая вязкость.

Волновое уравнение в цилиндрических координатах имеет вид:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 p}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}. \quad (17)$$

Волновое уравнение в сферических координатах имеет вид:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 p}{\partial \phi^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}, \quad (18)$$

Волновое уравнение для неоднородной среды принимает вид:

$$\nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho} \nabla p \right) - \frac{1}{\rho c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 . \quad (19)$$

Волновое уравнение для анизотропной среды принимает вид:

$$\nabla \cdot (\mathbf{C} \nabla p) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 , \quad (20)$$

где \mathbf{C} – тензор упругости.

Волновое уравнение для вязкой среды имеет вид:

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \frac{\eta}{\rho c^2} \nabla^2 \frac{\partial p}{\partial t} = 0 . \quad (21)$$

Волновое уравнение для среды с дисперсией принимает вид:

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \frac{\tau}{\rho c^2} \frac{\partial^3 p}{\partial t^3} = 0 , \quad (22)$$

где τ – время релаксации.

Волновое уравнение для среды с нелинейностью принимает вид:

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \frac{\beta}{\rho c^4} \frac{\partial^2 p^2}{\partial t^2} = 0 , \quad (23)$$

где β – коэффициент нелинейности.

Волновое уравнение для среды с поглощением имеет вид:

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \frac{\alpha}{\rho c^2} \frac{\partial p}{\partial t} = 0 . \quad (24)$$

Волновое уравнение для среды с диссипацией имеет вид:

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \frac{\gamma}{\rho c^2} \nabla^2 \frac{\partial p}{\partial t} = 0 , \quad (25)$$

где γ – коэффициент диссипации.

Волновое уравнение для среды с диффузией имеет вид:

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \frac{D}{\rho c^2} \nabla^2 \frac{\partial p}{\partial t} = 0 , \quad (26)$$

где D – коэффициент диффузии.

Волновое уравнение для среды с релаксацией имеет вид:

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \frac{\tau}{\rho c^2} \frac{\partial^3 p}{\partial t^3} = 0 . \quad (27)$$

Волновое уравнение для среды с гистерезисом имеет вид:

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \frac{\eta}{\rho c^2} \nabla^2 \frac{\partial p}{\partial t} = 0 . \quad (28)$$

Волновое уравнение для среды с вязкоупругостью имеет вид:

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \frac{\mu}{\rho c^2} \nabla^2 \frac{\partial p}{\partial t} = 0 \quad (29)$$

где μ – коэффициент вязкоупругости.

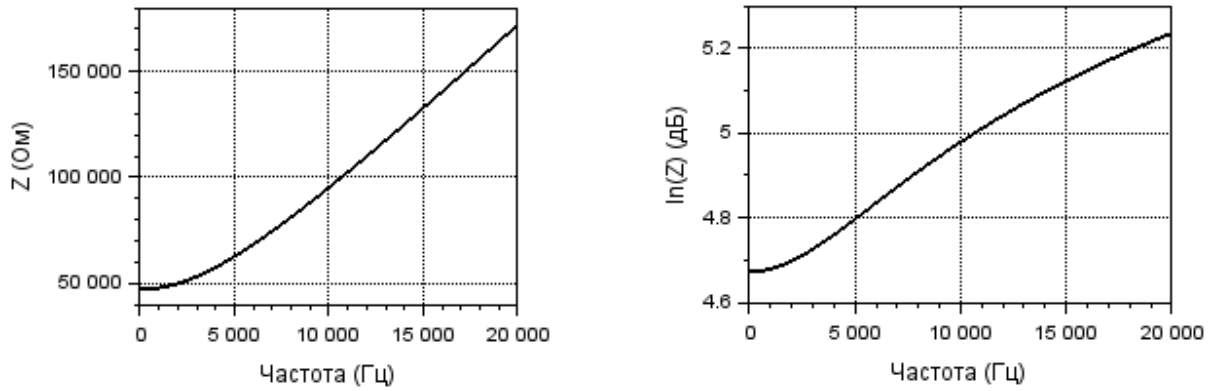


Рис. 1. Частотная характеристика импеданса элемента микшера в обычном и полулогарифмическом масштабах. Диаметр диффузора динамика в аудиосистеме равен 20.32 см. Эквивалентный объём динамиков равен примерно 60 литров. Добротность акустической системы равна 0.6. Порог компрессии звуковых сигналов в микшере равен 24 дБ. Коэффициент компрессии в микшере равен 2:1. Частота дискретизации равна 44.1 кГц.

Результаты

В настоящей работе проведены численные расчёты физических параметров микшера.

На рис. 1 приведено изображение частотной характеристики импеданса элемента микшера в обычном и полулогарифмическом масштабах. Диаметр диффузора динамика в аудиосистеме равен 20.32 см. Эквивалентный объём динамиков равен примерно 60 литров. Добротность акустической системы равна 0.6. Порог компрессии звуковых сигналов в микшере равен 24 дБ. Коэффициент компрессии в микшере равен 2:1. Частота дискретизации равна 44.1 кГц.

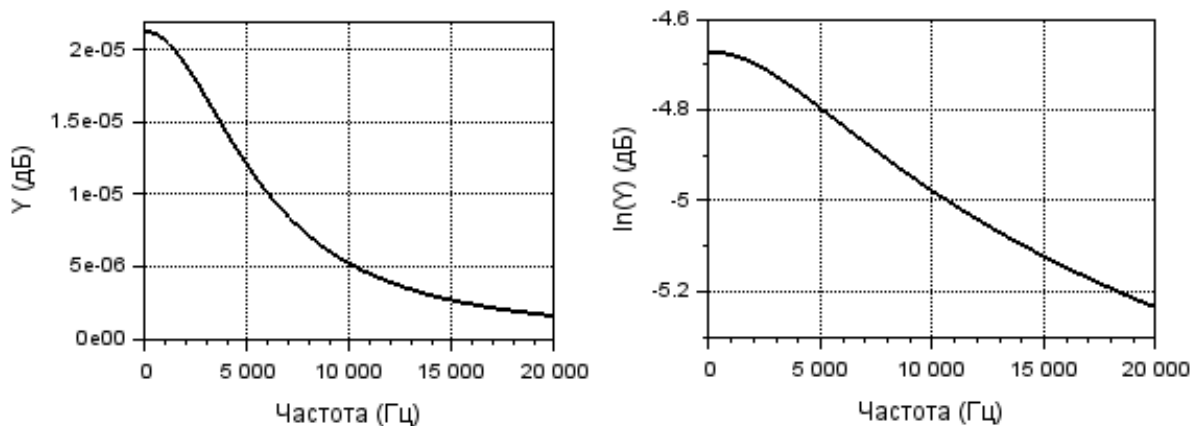


Рис. 2. Частотная характеристика адмиттанса $Y(\nu) = 1/Z(\nu)$ элемента микшера в обычном и полулогарифмическом масштабах.

На рис. 1 изображена частотная характеристика импеданса элемента микшера в обычном и полулогарифмическом масштабах. На рис. 2 изображена частотная характеристика адмиттанса элемента микшера в обычном и полулогарифмическом масштабах. На рис. 3 изображён график уровня звукового давления элемента микшера как функция частоты. На рис. 4 изображена амплитудно-частотная характеристика микшера в полулогарифмическом масштабе.

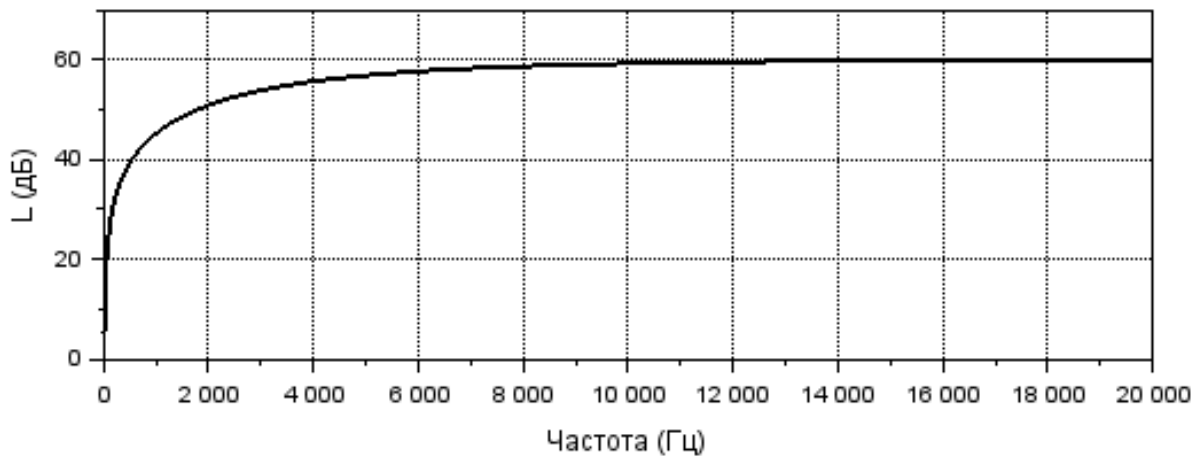


Рис. 3. Уровень звукового давления $L_p = 20 \lg(p/p_0)$ элемента микшера как функция частоты.

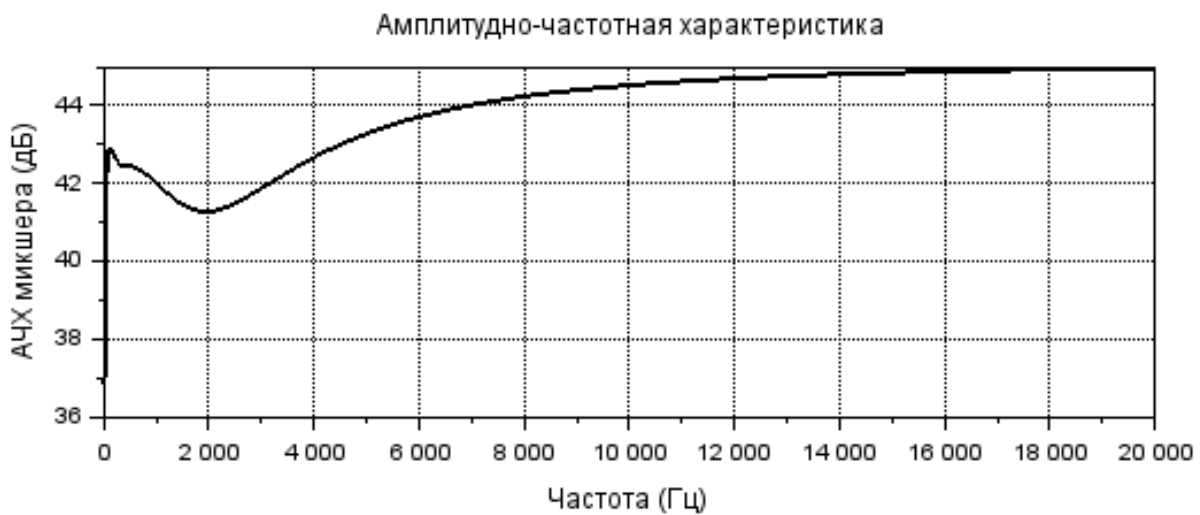


Рис. 4. Амплитудно-частотная характеристика микшера в полулогарифмическом масштабе.

Заключение

В работе получены новые данные о распространении звуковых волн в микшерных системах. Исследование физических процессов распространения звуковых волн в аудиосистемах помогает развивать теорию акустики, которая может быть применена в различных областях науки и техники, таких как медицина, акустика помещений, автомобильная акустика. Новые открытия в области акустики позволяют глубже понять механизмы распространения и взаимодействия звуковых волн с различными материалами и средами, что может привести к созданию более эффективных аудиосистем и акустических устройств. Понимание физических свойств процесса распространения звуковых волн в аудиосистемах имеет важное значение для оптимизации аудиотехнологий и позволяет создавать более качественные аудиосистемы и акустические устройства, которые могут быть использованы в процессе разработки новых технологий и улучшения качества звука аудиосистем, применяемых в различных сферах жизни, таких как музыка, кино, телевидение, образование и здравоохранение.

Список использованных источников

1. Gilbert P.U.P.A. Sound waves // Physics in the arts. — Elsevier, 2022. — P. 187–201. — ISBN: 9780128243473. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-824347-3.00010-8>.
2. Sengupta Tapan K., Bhumkar Yogesh G. Acoustic wave equation // Computational aerodynamics and aeroacoustics. — Springer Singapore, 2020. — P. 357–377. — ISBN: 9789811542848. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-981-15-4284-8_6.
3. Acoustic wave technology / Nilanjan Dey [et al.] // Acoustic sensors for biomedical applications. — Springer International Publishing, 2018. — jul. — P. 21–31. — ISBN: 9783319922256. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-92225-6_3.
4. Bessonov K. D., Tomchuk K. K. Acoustic systems for information transfer in audible range // 2020 Wave electronics and its application in information and telecommunication systems (WECONF). — IEEE, 2020. — jun. — P. 1–5. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/WECONF48837.2020.9131531>.
5. Chang Ching-Lung, Cai Meng-Lun, Shiao Yu-Shiang. Sound-wave transmission system in mobile device // IoT as a service. — Springer International Publishing, 2018. — P. 333–339. — ISBN: 9783030004101. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-00410-1_38.

Сведения об авторах:

Алсу Шамилевна Джаббарова — студент факультета физико-математического и технологического образования ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», Ульяновск, Россия.

E-mail: dzhabbarova.2005@mail.ru

ORCID iD  0009-0007-0382-5656

Web of Science ResearcherID  LGZ-5000-2024

Original article
PACS 43.20.+g
OCIS 160.1050
MSC 74J30

Investigation of physical processes of sound wave propagation in mixing systems

A. Sh. Dzhabbarova 

Ulyanovsk State Pedagogical University, 432071, Ulyanovsk, Russia

Submitted January 27, 2026
Resubmitted January 29, 2026
Published March 31, 2026

Abstract. This article examines the physical characteristics of sound processes in audio systems. The aim of the study is to analyze the physical processes of sound wave propagation in mixing systems to optimize their acoustic performance. The motivation for this research lies in the need to improve sound quality in professional audio systems. The research methods include mathematical modeling, experimental measurements, and numerical simulations. The hypothesis is that optimizing the geometry of mixing systems minimizes sound wave distortion. The results demonstrate the dependence of acoustic performance on system parameters, confirming the theoretical significance of the work. The practical significance lies in the potential application of the obtained data to the design of next-generation acoustic systems. The results of numerical calculations of the characteristics of the mixer's acoustic elements are presented.

Keywords: acoustics, acoustic system, audio system, acoustic parameters, sound wave, sound process, mixer, mixing system, numerical calculations

References


1. Gilbert P.U.P.A. Sound waves // Physics in the arts. — Elsevier, 2022. — P. 187–201. — ISBN: 9780128243473. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-824347-3.00010-8>.
2. Sengupta Tapan K., Bhumkar Yogesh G. Acoustic wave equation // Computational aerodynamics and aeroacoustics. — Springer Singapore, 2020. — P. 357–377. — ISBN: 9789811542848. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-981-15-4284-8_6.
3. Acoustic wave technology / Nilanjan Dey [et al.] // Acoustic sensors for biomedical applications. — Springer International Publishing, 2018. — jul. — P. 21–31. — ISBN: 9783319922256. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-92225-6_3.
4. Bessonov K. D., Tomchuk K. K. Acoustic systems for information transfer in audible range // 2020 Wave electronics and its application in information and telecommunication systems (WECONF). — IEEE, 2020. — jun. — P. 1–5. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/WECONF48837.2020.9131531>.

5. Chang Ching-Lung, Cai Meng-Lun, Shiao Yu-Shiang. Sound-wave transmission system in mobile device // IoT as a service.— Springer International Publishing, 2018.— P. 333–339.— ISBN: 9783030004101.— URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-00410-1_38.

Information about authors:

Alsu Shamilevna Dzhabbarova — 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: dzhabbarova.2005@mail.ru

ORCID iD  0009-0007-0382-5656

Web of Science ResearcherID  LGZ-5000-2024

Секция 3

Технические науки

3.1 Фотоника

Научная статья
УДК 535.015
ББК 22.343
ГРНТИ 29.31.21
ВАК 1.3.6.
PACS 42.25.Bs
OCIS 190.4720
MSC 74J30

Исследование физических свойств материалов нейроиконики

Е. А. Илюшкина  ¹

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

Поступила в редакцию 12 февраля 2026 года
После переработки 17 февраля 2026 года
Опубликована 31 марта 2026 года

Аннотация. Рассмотрены физические свойства материалов, используемых в нейроиконике. Целью работы является исследование физических свойств материалов, используемых в нейроиконике, для оптимизации их применения в нейроморфных системах. Мотивация обусловлена необходимостью создания энергоэффективных и высокопроизводительных материалов для искусственного интеллекта. Методы исследования включают анализ физических свойств материалов нейроиконики. Представлены результаты исследования физических характеристик материалов, используемых в нейроиконике. Практическая значимость заключается в разработке рекомендаций для создания новых материалов с заданными физическими свойствами.

Ключевые слова: материал, нейроиконика, материал нейроиконики, физические свойства, высокопроизводительный материал для искусственного интеллекта

¹E-mail: elenailuskina2004@gmail.com

Введение

Актуальность исследования обусловлена растущим спросом на материалы, способные имитировать нейронные процессы для применения в искусственном интеллекте и нейроморфных вычислениях.

Нейроиконика — это наука об изображениях, их построении в мозге, восприятии, откликах мозга на предъявление зрительных сигналов, механизмах принятия решений об изображении объектов, планировании и организации целенаправленных действий в зрительном пространстве в реальной и виртуальной среде, построении целостной картины мира. Предмет нейроиконики охватывает всю деятельность человека, в основе которой лежит изображение на сетчатке. Для обеспечения выживания и эффективной работы живого организма изображение должно быть представлено в мозге, распознано, а в результате принято решение.

Целью работы является исследование физических свойств материалов, используемых в нейроиконике, для оптимизации их применения в нейроморфных системах. Задачи исследования состоят в том, чтобы написать обзор литературы по нейроиконике, проанализировать физические свойства материалов, применяемых в нейроиконике, таких как пьезоэлектрики, пьезокерамика, композитные материалы.

Объектом исследования является набор материалов, используемых в нейроиконике, такие как пьезоэлектрики, пьезокерамика, нанокompозитные материалы и другие современные материалы. Предметом исследования является совокупность физических свойств материалов, используемых в нейроиконике, их взаимодействие с различными факторами и влияние на работу оптоэлектронных приборов и устройств нейроиконики.

Гипотеза исследования заключается в том, что если исследовать физические свойства модификаций структуры материалов нейроиконики, то можно создать новые высокоэффективные оптоэлектронные устройства отображения информации в контексте нейроиконики с существенно лучшими нейроморфными характеристиками.

Научная новизна исследования заключается в выявлении новых закономерностей и связей между физическими свойствами материалов нейроиконических устройств, в определении влияния структуры и состава материалов нейроиконических устройств на функциональные свойства устройств нейроиконики, а также в разработке новых методов и подходов к изучению физических свойств материалов для разработки более эффективных и безопасных устройств нейроиконики. Впервые проанализированы физические свойства нейроиконических устройств для прогнозирования поведения материалов нейроиконики.

Для проведения исследования используются следующие методы: анализ научной литературы по нейроиконике, математическое моделирование для численного исследования физических параметров материалов нейроиконики, таких как измерение электрических параметров, механических характеристик, термических свойств и других параметров в различных условиях эксплуатации. Материалы исследования включают в себя: научные статьи и публикации по нейроиконике, математические модели и алгоритмы, разработанные для анализа и прогнозирования свойств материалов нейроиконики, программное обеспечение для математического моделирования и численного прогнозирования поведения материалов нейроиконики.

Теоретическая значимость исследования заключается в систематизации и углублении теоретических знаний о физических свойствах материалов, используемых в нейроиконике, а также в разработке новых методов и подходов к изучению и анализу физических свойств материалов нейроиконики в развитии теории нейронных сетей. Исследование физических свойств материалов может привести к расширению теоретических знаний о физических свойствах материалов нейроиконики и установления физических механизмов взаимодействия элементов устройств нейроиконики. Практическая

значимость исследования заключается в возможности применения полученных результатов для разработки и усовершенствования нейроиконических устройств, повышения эффективности и надёжности нейроиконических устройств, создания материалов нейроиконики с улучшенными функциональными свойствами.

Обзор

В статье @auxrussian@auxenglish[1] предложено определение нейроиконики как раздела науки на стыке физиологии человека и животных и иконики, изучающего нейрофизиологические процессы и алгоритмы обработки видеoinформации, а также оценивающей возможность использования этих алгоритмов в технических системах. Нейроиконика определяется как научная дисциплина, которая объединяет аспекты физиологии человека и животных с иконоикой, фокусируясь на нейрофизиологических процессах, вовлечённых в обработку видеoinформации, и применении этих процессов в технических системах [1]. Эта область тесно связана с нейроэстетикой, которая исследует когнитивную нейронауку эстетических переживаний, исследуя, как активность мозга коррелирует с субъективными реакциями на искусство и красоту [2]. Хотя нейроэстетика набирает популярность, она сталкивается с критикой в отношении своих методологий и интерпретации эстетических переживаний [3, 4]. Интеграция вычислительных подходов в нейроэстетику, называемая вычислительной нейроэстетикой, направлена на преодоление разрывов между экспериментальными результатами и вычислительными моделями, улучшая понимание связей мозга во время эстетической оценки [5]. В целом, нейроиконика и нейроэстетика представляют собой междисциплинарные усилия по выяснению сложных взаимодействий между нейронными процессами и эстетическими переживаниями. Коммуникация относится к широкому спектру различных форм поведения и деятельности, направленных на передачу информации [6].

Модель

Структура материалов нейроиконики может быть описана с помощью кристаллической решётки. Рассмотрим простую кубическую решётку с параметром a . Энергия взаимодействия между атомами может быть выражена как:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i,j} V(r_{ij}) , \quad (1)$$

где $V(r_{ij})$ – потенциал взаимодействия между атомами i и j , а r_{ij} – расстояние между ними.

Проводимость материалов нейроиконики может быть описана с помощью модели Друде:

$$\sigma = \frac{ne^2\tau}{m} , \quad (2)$$

где n – концентрация носителей электрического заряда, e – заряд электрона, τ – время релаксации, m – эффективная масса носителей электрического заряда.

Для моделирования оптических свойств диэлектрическая проницаемость материала может быть выражена следующим образом:

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_\infty + \frac{\omega_p^2}{\omega_0^2 - \omega^2 - i\gamma\omega} , \quad (3)$$

где ϵ_∞ – высокочастотная диэлектрическая проницаемость, ω_p – плазменная частота, ω_0 – циклическая частота резонанса, γ – коэффициент затухания.

Для анализа транспортных свойств используем уравнение Больцмана:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla f + \frac{\mathbf{F}}{m} \cdot \nabla_{\mathbf{v}} f = \left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_{\text{coll}}, \quad (4)$$

где f – функция распределения, \mathbf{v} – скорость, \mathbf{F} – сила, m – масса, $\left(\frac{\partial f}{\partial t} \right)_{\text{coll}}$ – столкновительный член.

Для моделирования проводимости используем метод функционала плотности. Энергия системы может быть выражена как:

$$E[n] = T[n] + V[n] + E_{xc}[n], \quad (5)$$

где $T[n]$ – кинетическая энергия, $V[n]$ – потенциальная энергия, $E_{xc}[n]$ – обменно-корреляционная энергия.

Для изучения оптических свойств используем спектроскопию поглощения. Коэффициент поглощения может быть выражена как:

$$\alpha(\omega) = \frac{4\pi\kappa(\omega)}{\lambda}, \quad (6)$$

где $\kappa(\omega)$ – показатель поглощения, λ – длина волны.

Для анализа транспортных свойств используем метод Монте-Карло. Вероятность перехода между состояниями может быть выражена как:

$$P_{ij} = \exp\left(-\frac{E_j - E_i}{kT}\right), \quad (7)$$

где E_i и E_j – энергии состояний, k – постоянная Больцмана, T – температура.

Для модификации структуры материалов используем легирование. Концентрация легирующей примеси может быть выражена как:

$$N = \frac{\text{масса примеси}}{\text{масса материала}} \times N_A, \quad (8)$$

где N_A – число Авогадро. Структурные параметры влияют на свойства материалов. Например, изменение параметра решётки a приводит к изменению энергии взаимодействия:

$$E(a) = E_0 \left(1 - \frac{a_0}{a}\right)^2, \quad (9)$$

где E_0 – энергия взаимодействия при равновесном расстоянии a_0 . Для оптимизации свойств материалов используем метод градиентного спуска. Функция потерь может быть выражена как:

$$L = \sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2, \quad (10)$$

где y_i – экспериментальные данные, \hat{y}_i – предсказанные значения.

Зависимость проводимости от концентрации носителей заряда имеет вид:

$$\sigma(n) = \sigma_0 \left(1 + \frac{n}{n_0}\right), \quad (11)$$

где σ_0 – проводимость при нулевой концентрации, n_0 – характерная концентрация.

Теоретический анализ показывает, что проводимость зависит от температуры:

$$\sigma(T) = \sigma_0 \exp\left(-\frac{E_a}{kT}\right), \quad (12)$$

где E_a – энергия активации.

Проводимость материалов зависит от структурных параметров по закону:

$$\sigma(a) = \sigma_0 \exp\left(-\frac{a - a_0}{a_1}\right), \quad (13)$$

где a_0 и a_1 – характерные параметры решётки.

Анализ транспортных свойств показывает, что подвижность носителей заряда зависит от температуры:

$$\mu(T) = \mu_0 \left(\frac{T}{T_0}\right)^{-3/2}, \quad (14)$$

где μ_0 – подвижность при температуре T_0 .

Для оптимизации структуры материалов используем метод молекулярной динамики. Энергия системы может быть выражена как:

$$E = \sum_i \frac{p_i^2}{2m_i} + \sum_{i,j} V(r_{ij}), \quad (15)$$

где p_i – импульс атома i , m_i – масса атома i .

Для изучения свойств материалов используем метод рентгеновской дифракции. Интенсивность дифракционного пика может быть выражена как:

$$I = |F|^2 \frac{1 + \cos^2(2\theta)}{\sin^2(\theta) \cos(\theta)} \quad (16)$$

где F – структурный фактор, θ – угол дифракции.

Заключение

Исследование физических свойств материалов нейроиконики может иметь значительные практические применения для разработки новых материалов для нейроинженерии, которые будут более эффективными и безопасными. Исследование вносит вклад в развитие теории материалов для нейроморфных систем, расширяя понимание взаимосвязи между структурой и свойствами. Результаты исследования могут быть использованы для создания новых материалов с заданными свойствами, что важно для развития нейроморфных вычислительных систем. Результаты исследования могут быть использованы для разработки новых материалов с улучшенными нейроморфными характеристиками и создание методов для их оптимизации. Рекомендуется использовать разработанные модели для создания новых материалов нейроиконики с заданными свойствами.

Список использованных источников

1. Shelepin Yu. E., Lutsiv V. R., Korotaev V. V. Optical technologies and the visual picture of the world: iconics and neuroiconics // Journal of optical technology. — 2022. — aug. — Vol. 89, no. 8. — P. 434–436. — URL: <http://dx.doi.org/10.1364/JOT.89.000434>.
2. Neuroaesthetics: the cognitive neuroscience of aesthetic experience / Marcus T. Pearce [et al.] // Perspectives on psychological science. — 2016. — mar. — Vol. 11, no. 2. — P. 265–279. — URL: <http://dx.doi.org/10.1177/1745691615621274>.
3. Rampley Matthew. The image and neuroaesthetics // The Palgrave Handbook of Image Studies. — Springer International Publishing, 2021. — P. 719–733. — ISBN: 9783030718305. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-71830-5_44.

4. Kozbelt Aaron. Neuroaesthetics: the state of the domain in 2017 // Evolutionary studies in imaginative culture. — 2017. — apr. — Vol. 1, no. 1. — P. 181–192. — URL: <http://dx.doi.org/10.26613/ESIC.1.1.25>.
5. Li Rui, Zhang Junsong. Review of computational neuroaesthetics: bridging the gap between neuroaesthetics and computer science // Brain informatics. — 2020. — nov. — Vol. 7, no. 1. — URL: <http://dx.doi.org/10.1186/S40708-020-00118-W>.
6. Yachnaya V. O., Lutsiv V. R., Malashin R. O. Modern automatic recognition technologies for visual communication tools // Computer optics. — 2023. — apr. — Vol. 47, no. 2. — URL: <http://dx.doi.org/10.18287/2412-6179-CO-1154>.

Сведения об авторах:

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

E-mail: elenailuskina2004@gmail.com

ORCID iD  0009-0001-2593-9829

Web of Science ResearcherID  JRW-6162-2023

Original article
 PACS 42.25.Bs
 OCIS 190.4720
 MSC 74J30

Investigation of the physical properties of neuroiconic materials

E. A. Ilyushkina 

Ulyanovsk State Pedagogical University, 432071, Ulyanovsk, Russia

Submitted February 12, 2026

Resubmitted February 17, 2026

Published March 31, 2026

Abstract. The physical properties of materials used in neuroiconics are examined. The aim of this work is to investigate the physical properties of materials used in neuroiconics to optimize their application in neuromorphic systems. The motivation for this work lies in the need to create energy-efficient and high-performance materials for artificial intelligence. The research methods include analyzing the physical properties of neuroiconic materials. The results of a study of the physical characteristics of materials used in neuroiconics are presented. The practical significance of this work lies in the development of recommendations for creating new materials with desired physical properties.

Keywords: material, neuroiconics, neuroiconics material, physical properties, high-performance material for artificial intelligence


References

1. Shelepin Yu. E., Lutsiv V. R., Korotaev V. V. Optical technologies and the visual picture of the world: iconics and neuroiconics // *Journal of optical technology*. — 2022. — aug. — Vol. 89, no. 8. — P. 434–436. — URL: <http://dx.doi.org/10.1364/JOT.89.000434>.
2. Neuroaesthetics: the cognitive neuroscience of aesthetic experience / Marcus T. Pearce [et al.] // *Perspectives on psychological science*. — 2016. — mar. — Vol. 11, no. 2. — P. 265–279. — URL: <http://dx.doi.org/10.1177/1745691615621274>.
3. Rampley Matthew. The image and neuroaesthetics // *The Palgrave Handbook of Image Studies*. — Springer International Publishing, 2021. — P. 719–733. — ISBN: 9783030718305. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-71830-5_44.
4. Kozbelt Aaron. Neuroaesthetics: the state of the domain in 2017 // *Evolutionary studies in imaginative culture*. — 2017. — apr. — Vol. 1, no. 1. — P. 181–192. — URL: <http://dx.doi.org/10.26613/ESIC.1.1.25>.
5. Li Rui, Zhang Junsong. Review of computational neuroaesthetics: bridging the gap between neuroaesthetics and computer science // *Brain informatics*. — 2020. — nov. — Vol. 7, no. 1. — URL: <http://dx.doi.org/10.1186/S40708-020-00118-W>.
6. Yachnaya V. O., Lutsiv V. R., Malashin R. O. Modern automatic recognition technologies for visual communication tools // *Computer optics*. — 2023. — apr. — Vol. 47, no. 2. — URL: <http://dx.doi.org/10.18287/2412-6179-CO-1154>.

Information about authors:

Elena Alekseevna Ilyushkina — 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: elenailuskina2004@gmail.com

ORCID iD  0009-0001-2593-9829

Web of Science ResearcherID  JRW-6162-2023

Секция 4

Науки об образовании

4.1 Теория и методика обучения и воспитания

Научная статья
УДК 378.4
ББК 74.489
ГРНТИ 14.35.09
ВАК 5.8.2.
PACS 01.40.Di
OCIS 000.2060
MSC 97U70

Исследование методологии педагогического проектирования дистанционных курсов

Э. А. Юсифова  ¹

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

Поступила в редакцию 17 февраля 2026 года
После переработки 19 февраля 2026 года
Опубликована 31 марта 2026 года

Аннотация. Актуальность работы продиктована внедрением цифровых технологий в образование, требующих переосмысления методов проектирования дистанционных курсов. Целью является разработка и экспериментальная проверка методологии педагогического проектирования дистанционных курсов физики, интегрирующей физические лаборатории, интерактивные симуляции и робототехнические микроконтроллерные комплексы. Мотивацией стало наблюдаемое снижение мотивации обучающихся при удалённом формате и необходимость сохранения лабораторной составляющей физико-математического образования. Методами стали компаративный анализ цифровых платформ, педагогическое конструирование курсов.

Ключевые слова: дистанционный курс, педагогическое проектирование, методология, физическая лаборатория, конструирование курса, микроконтроллерный комплекс

¹E-mail: alyana.ysifova@mail.ru

Введение

Современная парадигма дистанционного образования физики сталкивается с фундаментальной проблемой: как передать опыт непосредственного взаимодействия с природой через экран монитора. Классическая лабораторная работа предполагает тактильный контакт с приборами, ощущение веса груза, звук работающего мотора, запах перегретой смазки — всё то, что формирует эмпирическую базу физического знания. Потеря этой сенсорной составляющей ведёт к абстрактному восприятию законов природы, что снижает мотивацию и увеличивает долю механического запоминания. Методология, предлагаемая в данном исследовании, решает эту проблему через трёхуровневую иерархию цифровых активностей, где каждый последующий уровень компенсирует дефицит предыдущего, создавая синергетический эффект, превышающий возможности традиционной очной лаборатории. Современная дистанционная среда сталкивается с парадоксом: физика как наука о явлениях, доступных непосредственному чувственному восприятию, преподаётся через экран, лишённый запаха озона, веса груза и тепла лампы накаливания. Педагогическое проектирование, стремясь восполнить этот дефицит, выстраивает цепочку цифровых активностей, каждая из которых компенсирует утрату предыдущей и создаёт новое качество опыта. Методология, предлагаемая в статье, описывает три взаимно усиливающих этапа: физический эксперимент с удалённым доступом, интерактивная симуляция, выводящая явление за пределы безопасности, и инженерный проект, превращающий закон в работающее устройство. Последовательность этих этапов не является жёсткой: система анализирует действия студента и подстраивает траекторию так, чтобы каждое последующее звено усиливало предыдущее, формируя устойчивое понимание физики как единого поля эмпирии, модели и технологии. Актуальность исследования определяется массовым переходом университетов на дистанционные форматы, сохраняющими потребность в практическом освоении физических явлений и формировании инженерных навыков без очного доступа к кампусной инфраструктуре.

Цель исследования состоит в разработке методологии педагогического проектирования дистанционных курсов физики, обеспечивающей сохранение лабораторного опыта, повышение когнитивной вовлечённости и формирование базовых компетенций программирования и робототехники без очного присутствия студента в университетской аудитории. Для достижения этой цели необходимо было проанализировать существующие подходы к удалённым лабораториям и выявить их педагогические ограничения, связанные с потерей тактильного и аудиального контакта с реальным физическим экспериментом. Далее требовалось сконструировать целостную модель курса, синхронизирующую физические эксперименты, интерактивные симуляции и микроконтроллерные проекты в единую облачную среду, обеспечивающую последовательное усвоение знаний от наблюдения до конструирования. Задачи исследования заключаются в анализе существующих подходов к удалённым лабораториям и выявлении их педагогических ограничений, в конструировании целостной модели курса, синхронизирующей физические эксперименты, интерактивные симуляции и микроконтроллерные проекты, а также в экспериментальной верификации эффективности предложенной методологии в условиях массового онлайн-обучения.

Объектом исследования является процесс педагогического проектирования дистанционных курсов, охватывающий проектные решения, программно-аппаратные комплексы и организационные схемы взаимодействия преподавателя и обучающихся в цифровой среде. Предметом исследования является совокупность методологических принципов интеграции физических лабораторий, интерактивных симуляций и робототехнических комплексов в единую образовательную среду удалённого доступа, обеспечивающую формирование универсальных учебных действий и практических навыков.

Гипотеза научного исследования выражается в предположении, что одновременное использование трёх типов цифровых активностей в структуре дистанционного курса обеспечит статистически значимый прирост показателей активности и успеваемости по сравнению с группами, ограниченными только видеолекциями и тестами.

Методы исследования включают теоретико-методологический анализ научной литературы и нормативных документов в области цифрового образования, проектное моделирование учебных траекторий с применением программно-инженерных инструментов. Материалы исследования составляют открытые данные международных репозиториях удалённых физических лабораторий, проанализированные для выявления передового опыта и типичных ошибок при переносе экспериментальной базы в онлайн. Программно-аппаратные комплексы на базе микроконтроллеров семейства ESP32 и Arduino, дополненные сенсорами и исполнительными механизмами, использовались для создания мини-лабораторий, доставляемых студентам почтой и управляемых через браузер. Аутентичные симуляционные среды PhET, Wolfram Mathematica и LabVIEW адаптировались под российские образовательные стандарты и интегрировались в единую облачную платформу, обеспечивающую единую точку входа и систему оценивания.

Научная новизна исследования состоит в первом комплексном описании методологии, объединяющей физические эксперименты с удалённым доступом, интерактивные симуляции с обратной связью в режиме реального времени и проектную деятельность на базе микроконтроллеров, во введении понятия «полилаборатория» как единой облачной среды, интегрирующей разнородные устройства, и в разработке метрического инструментария для оценки эффективности каждого из трёх компонентов в структуре смешанного курса. Впервые вводится понятие «полилаборатория» как единой облачной среды, интегрирующей разнородные устройства и программные модули в единую учебную траекторию с общей системой оценивания и микросервисной архитектурой, обеспечивающей масштабируемость и быструю замену компонентов. Разработан метрический инструментарий для оценки эффективности каждого из трёх компонентов в структуре смешанного курса, позволяющий преподавателю оперативно корректировать баланс между виртуальным и реальным опытом в зависимости от профиля группы и специфики дисциплины.

Теоретическая значимость исследования заключается в расширении теоретических представлений о взаимодействии виртуальных и реальных компонентов образовательного процесса, в уточнении понятия «лабораторный опыт» в цифровой среде образовательной организации и в обосновании необходимости трёхуровневой иерархии заданий: наблюдение, моделирование, конструирование. Практическая значимость исследования проявляется в готовых шаблонах курсов, размещённых в открытом доступе, в методических рекомендациях по выбору аппаратных платформ под задачи конкретной дисциплины и в алгоритме быстрой адаптации существующих очных лабораторных работ в формате удалённого доступа без потери дидактической ценности.

Обзор

В литературе выделен новый уровень проектирования учебных программ, называемый тактикой проектирования, который призван заполнить пробел между общими принципами, лежащими в основе разработки учебных программ, и детальным описанием конкретных видов деятельности и уроков. В статье [1] использование тактики проектирования иллюстрируется на примере последовательности из курса электромагнетизма для студентов средних курсов, а именно кольцевого цикла, разработанного в рамках проекта «Парадигмы в физике» в Университете штата Орегон. Ретроспективный анализ процесса разработки учебных программ выявил десять тактик проектирования, связанных с содержанием, осмыслением и практикой в классе. В статье [1]

дальнейший анализ внедрения таких тактик в средних школах Университета ДеПола и Калифорнийского государственного университета в Сан-Маркосе показывает, как тактика проектирования может также использоваться для адаптации к местным условиям и контексту. Тактика проектирования может служить продуктивным мостом между принципами проектирования более высокого уровня и разработкой учебных мероприятий.

В статье [2] представлены результаты исследования 353 вопросов с вариантами ответов, составленных преподавателями в формате «подумай-обсуди-поделись», позволило получить важные сведения о представлениях преподавателей о способах представления дисциплин и интеллектуальных задачах, которые могли бы заинтересовать учащихся в ключевых темах физики и астрономии. В статье [2] результаты показывают, что по многим темам наблюдается недостаток разнообразия в представлении дисциплин, сопоставимых интеллектуальных задачах и уровнях сложности, которые порождают вопросы, разрабатываемые преподавателями. Эти усилия послужили мотивацией и основой для разработки двух концептуальных моделей: модели характеристики учебной программы, которая позволяет систематически кодировать стратегии активного обучения с точки зрения способов представления дисциплин, интеллектуальных задач и сложности рассуждений, которые предлагает учащемуся та или иная деятельность, и модели разработки учебных программ, которая направляет разработку мероприятий, целенаправленно направленных на повышение уровня владения дисциплиной у учащихся. В статье [2] анализируются вопросы, разработанные преподавателями в рамках метода «подумай-обсуди-поделись», используя нашу концепцию характеристики учебной программы, а затем применяем нашу концепцию разработки учебных программ для создания вопросов, способствующих развитию беглости мышления, — более эффективного с педагогической точки зрения расширения хорошо зарекомендовавшей себя стратегии обучения, и заданий на представление информации студентами — совершенно нового типа учебной деятельности в астрономии, который перекладывает ответственность за создание соответствующих представлений на учащихся. В статье [2] подробно разбираем и приводим примеры вопросов, способствующих развитию беглости мышления, и заданий на представление информации студентами, описывая использование в них педагогических представлений дисциплины в сочетании с новыми форматами вопросов и заданий.

Технологически насыщенные, ориентированные на ученика аудитории, такие как SCALE-UP и TEAL, призваны активно вовлекать студентов в процесс обучения. В статье [3] исследуется, что происходит, когда дизайн аудитории (традиционные или ориентированные на учителя, или ориентированные на ученика помещения) соответствует или не соответствует эпистемологическим убеждениям учителя об обучении и преподавании (традиционные или ориентированные на учителя, или ориентированные на ученика педагогические подходы). В статье [3] сравниваются два типа педагогических подходов и два типа обстановки в аудитории с помощью квазиэкспериментального факторного эксперимента 2×2 . В статье [3] собраны данные от 214 студентов, зарегистрированных в восьми группах вводного курса механики на основе математического анализа, проводимого в канадском государственном двухгодичном колледже. Всем студентам был предложен тест Force Concept Inventory в начале и в конце 15-недельного курса. Затем в статье [3] сосредоточились на шести преподавателях, которым было поручено преподавать в ориентированных на ученика аудиториях. В статье [3] использованы качественные наблюдения и опросник «Подходы к преподаванию», заполняемый самими преподавателями, чтобы определить эпистемологические убеждения учителей (ориентированные на учителя или на ученика) и то, как эти убеждения влияли на использование ими учебного пространства и концептуальное обучение их

учеников. В статье [3] представлены четыре основных вывода. Во-первых, ориентированные на ученика учебные пространства наиболее эффективны при использовании в сочетании с педагогикой, ориентированной на ученика. Во-вторых, ориентированные на ученика классы неэффективны при использовании в сочетании с педагогикой, ориентированной на учителя, и могут оказывать негативное воздействие на учеников с низким уровнем предварительных знаний. В-третьих, в статье [3] обнаружена сильная корреляция между самооценкой шести преподавателей относительно ориентированности на ученика и средним нормализованным приростом в их классах ($r = 0.91$, $p = 0.012$). Наконец, в статье [3] обнаружено, что некоторые преподаватели более охотно внедряют методы обучения, ориентированные на ученика, после использования таких учебных пространств. Эти данные свидетельствуют о том, что ориентированные на студента классы эффективны только тогда, когда эпистемологическая концепция преподавания и обучения преподавателей соответствует педагогике, ориентированной на студента. Однако использование ориентированных на студента классов может со временем изменить эпистемологические концепции преподавателей.

В статье [4] изучается влияние нового применения генеративного искусственного интеллекта в преподавании физики: вовлечение студентов в разработку, уточнение и проверку моделирования физических явлений, созданных с помощью искусственного интеллекта. На втором семестре курса физики для студентов биологических специальностей в статье [4] провели сравнительное исследование трёх подходов к обучению в лаборатории, посвящённой электрическим потенциалам: студенты с использованием физического оборудования, студенты с использованием готового симулятора и студенты с использованием искусственного интеллекта для создания симуляции. Анализ показал, что студенты как в условиях использования симулятора, созданного с помощью искусственного интеллекта, так и в условиях использования готового симулятора показали значительно более высокие результаты по концептуальным оценкам, чем студенты в условиях использования физического оборудования. Студенты в этих группах также сообщили о более позитивном восприятии процесса обучения. Наконец, это предварительное исследование подчеркивает возможности развития навыков моделирования у студентов посредством процессов проектирования, уточнения и проверки моделирования.

В статье [5] представлен анализ поддержки, оказанной будущим учителям физики, обучающимся на курсе методики преподавания физики ($N = 28$) в исследовательском университете, во время работы над разработкой 20 уроков по механике и волнам, которые они впоследствии преподавали в рамках курса. Будущие учителя представили 4 доработанных плана для каждого урока и получили руководство и поддержку на двух последовательных консультационных встречах по каждому плану (по 30 минут каждая), а также письменные отзывы через веб-сайт курса. Используя методы обоснованной теории, анализ исследует взаимодействие между преподавателями и будущими учителями в процессе разработки планов уроков, зафиксированное на видеозаписях консультационных встреч и в письменной переписке. В статье [5] анализируются инициированные будущими учителями физики и инициированные преподавателями проблемы, руководство и поддержку, чтобы выявить и раскрыть неявные профессиональные знания, практики и убеждения. Сформировавшаяся категоризация формулирует знания, практики и убеждения, которые лежат в основе и направляют разработку уроков физики, предлагающих углубленное изучение концепций, процедур, практик и эпистемологических аспектов физики в увлекательной и содержательной форме для учащихся, а также способствующих активному обучению. Обсуждается, в какой степени эти категории укоренены в данной дисциплине.

В статье [6] представлен инструмент, который назван «Оценка нарушения педаго-

гических ожиданий», позволяющий преподавателям оценить один из аспектов успеха внедрения педагогической реформы путем анализа ожиданий и опыта студентов в классе. В статье [6] внедрена «Оценка нарушения педагогических ожиданий» в четырёх классах физики в трёх учебных заведениях, использующих педагогику «Студенческо-ориентированная активная учебная среда для программ бакалавриата» (SCALE-UP), чтобы понять первоначальные ожидания студентов, как эти ожидания меняются в начале занятий и что студенты сообщают о своем опыте в конце семестра. В статье [6] результаты показывают соответствующие изменения в ожиданиях студентов во время ориентации, но некоторые расхождения между ожиданиями студентов и их опытом сохранялись. В статье [6] студенты оценили коммуникативные аспекты «Студенческо-ориентированной активной учебной среды для программ бакалавриата» как желательные и указали на в целом положительное отношение к педагогике, что свидетельствует о том, что нарушения их первоначальных ожиданий в основном носили позитивный характер. Изучая закономерности изменений в ожиданиях студентов и расхождения между этими ожиданиями и их опытом, в статье [6] получаем информацию, которая может помочь улучшить как ориентацию студентов, так и реализацию курса.

Исследования в области обучения и практики учителей за последние три десятилетия показывают, что учителям конкретного предмета необходимы знания, отличающиеся от знаний других экспертов в данной области. Однако эта специализированная версия предметных знаний, необходимая учителям для планирования обучения, реагирования на идеи учащихся и оценки их понимания в режиме реального времени, является теоретически трудноуловимой концепцией. Крайне важно для областей подготовки учителей довузовской подготовки, профессионального образования учителей и профессионального развития преподавателей высших учебных заведений (а) уточнить концепцию, лежащую в основе этих специализированных предметных знаний, (б) операционализировать её в какой-либо области, (в) измерить её как в статических контекстах, так и в процессе её применения в классе, и (г) соотнести её наличие с «богатством» обучения в классе и её влиянием на усвоение знаний учащимися. В данной статье описывается часть многолетней межинституциональной работы по исследованию пунктов (а)–(г) в области энергетики в первом курсе физики средней школы. В частности, в статье [7] описываем разработанную нами структуру для уточнения предметных знаний для преподавания в контексте изучения энергетики в средней школе. Далее в статье [7] описывается процесс разработки, тестирования и доработки интерактивной оценочной формы, проводимой на компьютере, и обсуждаем содержательные и психометрические характеристики нескольких заданий на основе полевых испытаний окончательной версии оценки. В статье [7] обсуждаются задания с двойной целью: проиллюстрировать применение нашей общей концепции и представить результаты оценки, полученные на выборке из 362 практикующих учителей физики в средних школах.

В статье [8] представлено научное описание педагогических практик программы подготовки учителей физики и физических наук в Университете Рутгерса. Программа фокусируется на трех аспектах подготовки учителей: знание физики, знание педагогики и знание того, как преподавать физику. Программа существует уже 7 лет и обеспечивает стабильный темп выпуска в среднем шести учителей в год, которые остаются в профессии. В статье [8] представляется информация о возможной структуре, организации и отдельных элементах программы подготовки учителей физики. Философия программы и учебные курсы могут быть реализованы как на кафедре физики, так и в педагогическом факультете. В статье [8] подробно описываются учебные курсы программы и опыт преподавания, а также предлагаются способы адаптации к другим местным условиям.

Анализ предельных случаев важен для практикующих физиков. Однако существует мало конкретных рекомендаций для преподавателей физики, и в исследовательском

сообществе отсутствует консенсус относительно того, как помочь студентам изучать анализ предельных случаев и извлекать из него пользу. В статье [9] рассматривается существующая литература, чтобы выявить общие черты и различия в том, как преподаватели поощряют и оценивают анализ предельных случаев у студентов, и чтобы показать, как он используется практикующими физиками. Затем в статье [9] изучаются письменные работы последовательных групп студентов-физиков, все из которых прошли курс у одного и того же преподавателя, который делает акцент на анализе предельных случаев в своем преподавании. В статье [9] строится анализ в основном на основе теоретической концепции «адаптивной экспертизы», находя в литературе подтверждение точки зрения, что именно неалгоритмические и даже игровые аспекты анализа предельных случаев играют важную роль в его соответствии адаптивной экспертизе, а не рутинной экспертизе. В статье [9] анализ комментариев студентов о том, как они решают, какие предельные случаи следует рассматривать при оценке обоснованности уравнения, даёт новые представления о том, как можно лучше поддерживать анализ предельных случаев в классе, чтобы больше студентов могли получить доступ к этому важному инструменту физики.

В естественнонаучном образовании крайне важно, чтобы учителя учитывали академические и эмоциональные потребности учащихся. Прогнозирование учителями состояния обучения учащихся обычно рассматривается как показатель компетентности в понимании учащихся. В статье [10] изучены результаты и процесс прогнозирования, отражающие педагогические знания учителей в предметной области. В статье [10] исследование было направлено на выявление различий в поведении будущих учителей в отношении движений глаз с использованием технологии отслеживания движений глаз между группой, использующей прогнозирование, и группой, не использующей прогнозирование. Группа, использующая прогнозирование, предсказывала наиболее вероятный вариант ответа учащихся на данный вопрос, в то время как группа, не использующая прогнозирование, решала задачи самостоятельно. Результаты показали, что будущие учителя в группе, использующей прогнозирование, были более внимательны к идеям учащихся и анализировали информацию в различных областях интересов, когда им требовалось определить проблему с точки зрения учащихся. В группе, использующей прогнозирование, будущие учителя с положительным прогнозом больше фокусировались на правильном варианте ответа, в то время как учителя с отрицательным прогнозом, как правило, тщательно изучали каждый неправильный вариант. Кроме того, участники группы, не умеющие предсказывать, успешно и неуспешно решали задачи по-разному: успешные участники уделяли больше внимания анализу информации из вариантов ответов, включая как правильные, так и неправильные.

Преподаватели университетов имеют долгую историю преподавания физики не только в формальных аудиторных условиях, но и в неформальной просветительской среде. Педагогические практики преподавателей университетов в неформальном преподавании физики изучены недостаточно, и они могут дать представление о формальных практиках и подготовке. В статье [11] исследуется взаимодействие между преподавателями университетов и детьми в рамках внешкольной программы по физике, проводимой студентами-физиками из Университета Колорадо в Боулдере. В этой программе студенты-физики, аспиранты и постдокторанты еженедельно в течение семестра работают с детьми от детского сада до 8 класса, проводя практические занятия по физике. В статье [11] используется теоретико-деятельную модель в качестве инструмента для изучения ситуационных аспектов поведения отдельных лиц в сложной структуре внешкольной программы. Используя эту модель, в статье [11] анализируются видеозаписи взаимодействия преподавателей университетов с детьми и выявляем три основных педагогических подхода, которые преподаватели университетов демонстрируют во время

занятий: обучение, консультирование и участие. Эти модели характеризуются определенным языком, физическим местоположением и целями, которые устанавливают различия в ролях преподавателя и ребенка в университете, а также в разделении труда. На основе этого анализа в статье [11] обсуждаются последствия для продвижения педагогических стратегий посредством целенаправленной разработки учебных программ и подготовки преподавателей университетов.

В статье [12] оценивается влияние отработки педагогических навыков в симуляторе смешанной реальности на методы обучения аспирантов-преподавателей, а также на результаты обучения студентов бакалавриата. Тренировка на симуляторе призвана предоставить аспирантам-преподавателям возможность целенаправленно практиковать основные педагогические навыки, поддерживающие активное обучение, в частности, в контексте объединенных практических и лабораторных занятий вводного курса физики на основе алгебры. В течение трёх семестров аспиранты-преподаватели участвовали в различном количестве репетиций на симуляторе: без тренировки, с одной и четырьмя сессиями. В статье [12] проведено 109 наблюдений за занятиями 23 аспирантов-преподавателей, используя модифицированную версию Протокола лабораторных наблюдений для студентов бакалавриата по STEM-дисциплинам (LOPUS); в статье [12] также задокументировали частоту использования навыков, связанных с задаванием вопросов (например, «холодные звонки»), аспирантами-преподавателями. В статье [12] результаты обучения студентов бакалавриата измерялись с помощью предварительного и итогового тестирования по концептуальному опроснику силы и концептуальному обзору электричества и магнетизма. Для классификации и характеристики методов обучения, используемых аспирантами-преподавателями, в статье [12] проведён иерархический кластерный анализ и выявлено три стиля обучения: стиль работы в малых группах, стиль работы со всем классом и стиль «официанта». Результаты показывают, что четырехсессионное обучение на симуляторе в течение семестра помогло аспирантам-преподавателям перейти от стиля «официанта» к стилю работы со всем классом и внедрить методы задавания вопросов и «холодных звонков». Хотя в семестре без обучения на симуляторе новые аспиранты-преподаватели демонстрировали более интерактивное поведение, чем опытные, в статье [12] обнаружили, что четырехсессионное обучение на симуляторе помогло как новым, так и опытным аспирантам-преподавателям использовать более интерактивные стили обучения и чаще применять навыки, связанные с задаванием вопросов. Хотя результаты демонстрируют эффективность обучения на симуляторе, в статье [12] анализ также указывает на области для улучшения. В ходе четырехсессионного обучения аспиранты-преподаватели, как правило, смещали стиль работы с малыми группами в сторону работы со всем классом, а еженедельное применение навыков, связанных с задаванием вопросов, уменьшалось в течение семестра, несмотря на увеличение общего применения. Кроме того, результаты обучения студентов в разных семестрах (с разным количеством репетиций на симуляторе) не показали статистически значимой разницы. Однако стили преподавания аспирантов-преподавателей коррелировали с результатами студентов по итоговому тесту на знание концепции силы с небольшим размером эффекта при контроле результатов предварительного теста на знание концепции силы и преподавателей лекций; корреляция между стилем преподавания аспирантов-преподавателей и результатами студентов по итоговому тесту на знание концепции электричества и магнетизма не была обнаружена. В заключение в статье [12] обсуждаются факторы, которые могли привести к успеху обучения на симуляторе, а также стратегии дальнейшего повышения эффективности обучения на симуляторе.

Недавние исследования показывают, что социально-конструктивистские педагогические методы, такие как активное обучение, интерактивное взаимодействие и обучение на основе исследований, хотя и более эффективны с педагогической точки зрения, могут

способствовать неравенству в классе. В статье [13] проведя количественное эмпирическое исследование гендерно-неравноправной групповой динамики в двух лабораторных занятиях по физике, основанных на исследовательском подходе, в статье [13] расширяются результаты предыдущих работ. Используя опрос о предпочтениях в групповой работе и видеозаписи лабораторных занятий, в статье [13] обнаруживаем схожие закономерности гендерного распределения ролей, отмеченные в предыдущих исследованиях. Эти результаты не сводятся к различиям в предпочтениях студентов. В статье [13] обнаружено, что вмешательство, включающее использование форм соглашения между партнерами с целью уменьшения неравенства, оказало положительное влияние на вовлечённость студентов в работу с оборудованием во время лабораторного курса в первом семестре.

Целью исследования, представленного в статье [14], было систематическое обобщение видов деятельности и приложений, которые преподаватели могут использовать для эффективного проведения синхронных виртуальных занятий. Используя определенные ключевые слова в различных базах данных, в статье [14] изучена литература, чтобы выявить виды деятельности и приложения, связанные с эффективным проведением синхронных виртуальных занятий. В статью [14] было включено 70 работ, отобранных на основе заранее определенных критериев. В статье [14] в общей сложности было получено 53 вида деятельности и приложения для эффективного проведения синхронных виртуальных занятий, которые были классифицированы в соответствии с девятью этапами обучения Гагне. Эти виды деятельности и приложения были отсортированы по 11 тематическим измерениям: технический контроль, контроль среды, ясность изложения, вводные мероприятия, технологические инструменты, учебные материалы, взаимодействие, обратная связь, подведение итогов, управление временем и самооценка. Синхронные виртуальные занятия, проводимые в соответствии с этой классификацией, послужат руководством для преподавателей по эффективному проведению синхронных виртуальных занятий.

В статье [15] описаны методологические аспекты проектирования контента и организации цифрового пространства в электронных курсах. В статье [16] описаны методологические аспекты проектирования учебных задач. В статье [17] педагогический дизайн рассматривается как инструмент мотивации.

В условиях глобального роста онлайн-обучения обеспечение качества учебных материалов приобретает первостепенное значение. Хотя многие руководящие документы по качеству способствуют установлению стандартов в онлайн-обучении, они часто фокусируются на инфраструктуре и поддержке, игнорируя педагогический и визуальный дизайн учебных материалов. В статье [18] исследование восполняет этот пробел, анализируя двенадцать руководящих документов по качеству из различных образовательных контекстов, включая Южную Африку, чтобы выделить ключевые педагогические и визуальные принципы представления для проектирования и разработки учебных материалов в онлайн-среде. Опираясь на «Первые принципы обучения» Меррилла и Маргаряна и «Мультимедийные принципы» Майера, исследование интегрирует эти основы в этапы проектирования и разработки модели ADDIE. Анализ выявил сотрудничество и автономию обучающегося как наиболее подчеркиваемые педагогические принципы, а также мультимодальность и персонализацию как ведущие принципы визуального дизайна. Эти выводы легли в основу создания педагогической и визуальной презентационной структуры — практического инструмента, помогающего разработчикам учебных материалов улучшать и обеспечивать качество учебных материалов в онлайн-среде в различных высших учебных заведениях. Данное исследование способствует формированию теоретически обоснованного понимания качества проектирования онлайн-обучения, что особенно актуально для недостаточно представленных групп населения.

Методы и этапы проектирования курса с лабораториями

Педагогический дизайн дистанционных курсов представляет собой системный процесс проектирования, разработки и оценки учебных материалов, направленный на создание эффективной и вовлекающей образовательной среды.

Проектирование начинается с выбора явления, обладающего наглядностью и воспроизводимостью в бытовых условиях. Методика проектирования дистанционного курса с физическими лабораториями воспроизводит реальный эксперимент в условиях удалённого доступа. Студент получает по почте компактный набор датчиков и исполнительных механизмов, собранных на базе микроконтроллера ESP32 с предустановленной прошивкой. Устройство подключается к домашнему Wi-Fi и транслирует показания в облачную платформу, где они визуализируются в режиме реального времени. Методологически важно, что комплект не является игрушкой: масштабы, погрешности и временные характеристики остаются теми же, что и в университетской лаборатории. Преподаватель заранее калибрует датчики, записывает эталонные значения в память микроконтроллера и вкладывает в посылку методичку, где описывает не только последовательность действий, но и физический смысл каждого шага. Студент, подключая провода и закручивая винты, проходит через тот же эмпирический путь, что и его очный коллега, но делает это в своей кухне. Система обратной связи реализуется через веб-интерфейс: если показания датчика выходят за допустимый диапазон, платформа подсвечивает соответствующее поле красным и выдаёт подсказку, аналогичную той, которую преподаватель шепнул бы на ухо в аудитории. Критерием служит возможность свести полный набор измерений к компактному набору датчиков, помещающемуся в конверт формата А4. Для каждого студента рассчитывается индивидуальный погрешностной бюджет: если целью является изучение линейного закона Ома, то достаточно двух резисторов и мультиметра с классом точности 1.0; если же ставится задача выявить вклад контактного потенциала, потребуются компенсационная схема и датчик температуры, позволяющий учесть тепловую электродвижущую силу. На этапе производства преподаватель собирает партию устройств, калибрует каждый экземпляр и записывает эталонные значения в энергонезависимую память микроконтроллера, чтобы студент не мог случайно подменить шкалу и получить ложное согласие теории с опытом. Методически важно, что комплект поставляется вместе с тремя видами инструкций: краткой, где описана только последовательность подключений, развёрнутой, объясняющей физический смысл каждого шага, и рефлексивной, содержащей вопросы, на которые студент должен ответить, прежде чем перейти к следующему измерению. Когда студент подключает устройство к домашнему Wi-Fi, платформа начинает собирать потоковые данные и строит график в режиме реального времени, но не выдаёт готовую зависимость, а предлагает студенту самому выбрать масштаб и вид осей, чтобы он осознанно пришёл к линейному виду графика. Если точки отклоняются от прямой более чем на допустимую погрешность, система не сообщает, где ошибка, а предлагает сравнить свой набор данных с анонимизированными результатами других участников, формируя коллективное чувство прецизионной ответственности. Завершение этапа происходит тогда, когда студент загружает отчёт, в котором не просто перечислены числа, а раскрыта причинно-следственная связь между конкретным шумом в цепи и физическим явлением, вызвавшим этот шум. Таким образом, удалённая лаборатория приобретает новое качество в виде возможности многократно возвращаться к одному и тому же фрагменту данных, пока он не станет частью личного опыта.

Проектирование курса с интерактивными симуляциями

Следующий этап призван решить проблему безопасности и масштаба: физический эксперимент ограничен диапазоном температур, напряжений и механических нагрузок, при которых сохраняется целостность оборудования. Методика интеграции интерактивных симуляций призвана компенсировать невозможность варьировать параметры вне безопасных пределов. Физический эксперимент ограничен диапазоном напряжений, допустимых нагрузок и температурных режимов, поскольку реальное оборудование может быть повреждено. Интерактивная симуляция, построенная на базе движка Wolfram Mathematica, позволяет студенту изменить любой параметр до фантастических значений и наблюдать, что произойдёт, если масса груза станет отрицательной, а коэффициент трения превысит единицу. Методологически важно, что симуляция не является самостоятельной игрой: она запускается только после того, как студент успешно завершил реальный эксперимент и ввёл эталонные значения. Платформа сравнивает измеренные данные с расчётными и выдаёт визуализацию погрешности, тем самым формируя у студента чувство корреляции между абстрактной формулой и физической реальностью. Следующий шаг — эксперимент в симуляции за пределами допустимого: студент увеличивает температуру до плазменного диапазона и наблюдает, как меняется вид уравнения состояния, затем возвращается в физическую лабораторию и обсуждает, почему реальный прибор не выдержал бы такого режима. Эта методика превращает симуляцию из развлечения в инструмент познания границ применимости физических моделей, что является ключевым метапредметным навыком. Симуляция, построенная на базе системы компьютерной алгебры, позволяет изменить любой параметр до фантастических значений и наблюдать, как меняется вид уравнения состояния, когда температура превышает плазменный порог или когда магнитное поле становится настолько сильным, что квантовые уровни сливаются в континуум. Методически важно, что доступ к симуляции открывается только после того, как студент продемонстрировал достаточную точность в реальном эксперименте: платформа сравнивает его погрешность с пороговым значением и выдаёт ключ шифрования, расшифровывающий файл модели. Это искусственное ограничение создаёт эффект «двери в невидимый мир», подчеркивая ценность проделанной ручной работы. Внутри симуляции студент получает не готовый интерактивный виджет, а исходный код на языке Wolfram Language, где каждая строчка снабжена комментарием, объясняющим физический смысл константы или граничного условия. Первое задание состоит в том, чтобы воспроизвести свои реальные измерения и убедиться, что модель даёт ту же кривую в пределах малых полей; второе — увеличить параметр в десять раз и записать, при каком значении начинается отклонение; третье — выяснить, какой новый член уравнения придётся добавить, чтобы согласие восстановилось. Завершение этапа фиксируется в форме мини-статьи, которую студент размещает в открытом репозитории: он должен не только привести графики, но и аргументировать, почему именно такая модификация уравнения является физически обоснованной. Таким образом, симуляция становится не развлечением, а инструментом познания границ применимости физических теорий, что формирует метапредметное чувство масштаба и ответственности за выбор модели.

Методы и этапы проектирования курса с робототехникой

Завершающий этап переводит знание в технологию. Методика интеграции робототехники и программирования воспроизводит физический принцип в автоматизированной системе, заставляя студента стать инженером. После того как студент изучил явление в реальном эксперименте и исследовал его поведение в симуляции, он получает задание спроектировать устройство, которое использует это явление для решения практиче-

ской задачи. Например, изучив закон Кулона, студент программирует микроконтроллер так, чтобы тот автоматически регулировал заряд конденсатора в зависимости от расстояния до объекта, создавая систему беспроводной зарядки для смартфона. Студент получает задание спроектировать устройство, которое использует изученное явление для решения практической задачи: после закона Кулона — систему беспроводной зарядки, после закона Архимеда — автоматическую дозировку жидкости, после эффекта Холла — бесконтактный тахометр. Методически важно, что проект не сводится к сборке готового конструктора: преподаватель выдаёт только спецификацию требований (например, КПД зарядки не ниже 60 %, масса не более 150 г, стоимость комплектующих до 500 рублей) и набор непрограммированных микроконтроллеров. Методологически важно, что проект не сводится к сборке конструктора: студент сам выбирает схему, рассчитывает номиналы элементов, пишет код на языке C++ и отлаживает его через удалённый терминал. Платформа предоставляет доступ к виртуальному осциллографу, подключённому к выводам микроконтроллера, что позволяет наблюдать форму сигнала в режиме реального времени. Студент сам выбирает топологию схемы, рассчитывает номиналы элементов, пишет код на C++ и отлаживает его через удалённый терминал, подключённый к виртуальному осциллографу. Платформа предоставляет доступ к облачному симулятору печатной платы, где можно проверить, не пересекаются ли дорожки, и сразу заказать изготовление прототипа по цене школьного обеда. Когда плата приходит по почте, студент впаяет элементы и запускает тест в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным: зарядку проверяет на собственном смартфоне, дозатор — на кружке кофе, тахометр — на вентиляторе компьютера. Результаты измерений автоматически сравниваются с расчётными, а отклонения становятся поводом для следующей итерации проектирования. Проводится тестирование устройства в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным: студент помещает смартфон на зарядную платформу и измеряет коэффициент полезного действия, затем сравнивает его с теоретическим пределом, рассчитанным из законов электродинамики. Завершение этапа происходит тогда, когда устройство не только выполняет спецификацию, но и снабжено пользовательской инструкцией, написанной так, чтобы любой другой студент мог воспроизвести результат без доступа к исходной методичке. Симуляция даёт безопасный способ ответить на этот вопрос и обнаружить границы применимости модели. Робототехнический проект переводит полученное знание в технологию, заставляя студента стать активным творцом, а не пассивным наблюдателем. Методологически важно, что переход между уровнями не является механическим: платформа анализирует поведение студента и предлагает следующий шаг только тогда, когда предыдущий усвоен достаточно глубоко. Например, если студент в симуляции не смог объяснить происхождение отклонения от теоретической кривой, система возвращает его к реальному эксперименту и предлагает повторить измерения с повышенной точностью. Это создаёт адаптивную траекторию, где каждый студент проходит индивидуальный путь, но все приходят к общему результату в виде понимания физической реальности как единого поля законов, моделей и технологий. Таким образом, инженерный проект замыкает цикл от физического закона к технологии, формируя системное мышление и чувство ответственности за конечный продукт. Эта методика формирует системное мышление, поскольку требует от студента перевести физическую формулу в алгоритм, а алгоритм — в работающее устройство, тем самым закрывая полный цикл от знания к технологии.

Заключение

Предложенная методология не компенсирует потерю очной лаборатории, а создаёт новую среду, где ограничения старого формата становятся преимуществами. Удалённый доступ снимает временные и пространственные рамки, симуляция расширяет диа-

пазон исследуемых явлений, робототехника формирует инженерные навыки, недоступные в классической академической лаборатории. Важно, что каждый этап усиливает предыдущий: реальный эксперимент вызывает вопрос, симуляция даёт безопасный способ на него ответить, проект превращает ответ в технологию. Результатом становится не просто знание законов физики, а способность применять их для решения новых задач, что и является целью современного физико-технического образования в условиях цифровой трансформации.

Список использованных источников


1. Kustusch Mary Bridget, Manogue Corinne, Price Edward. Design tactics in curriculum development: examples from the paradigms in physics ring cycle // Physical review physics education research. — 2020. — dec. — Vol. 16, no. 2. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.16.020145>.
2. French Rica Sirbaugh, Prather Edward E. From a systematic investigation of faculty-produced think-pair-share questions to frameworks for characterizing and developing fluency-inspiring activities // Physical review physics education research. — 2020. — dec. — Vol. 16, no. 2. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.16.020138>.
3. Lasry Nathaniel, Charles Elizabeth, Whittaker Chris. When teacher-centered instructors are assigned to student-centered classrooms // Physical review special topics - physics education research. — 2014. — may. — Vol. 10, no. 1. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.10.010116>.
4. Leveraging generative artificial intelligence for simulation-based physics experiments: a new approach to virtual learning about the real world / Yossi Ben-Zion [et al.] // Physical review physics education research. — 2026. — jan. — Vol. 22, no. 1. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/s8dy-kqy5>.
5. Kapon Shulamit, Merzel Avraham. Content-specific pedagogical knowledge, practices, and beliefs underlying the design of physics lessons: a case study // Physical review physics education research. — 2019. — may. — Vol. 15, no. 1. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.15.010125>.
6. Gaffney Jon D. H., Gaffney Amy L. Housley, Beichner Robert J. Do they see it coming? Using expectancy violation to gauge the success of pedagogical reforms // Physical review special topics - physics education research. — 2010. — feb. — Vol. 6, no. 1. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.6.010102>.
7. Design of an assessment to probe teachers' content knowledge for teaching: An example from energy in high school physics / Eugenia Etkina [et al.] // Physical review physics education research. — 2018. — may. — Vol. 14, no. 1. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.14.010127>.
8. Etkina Eugenia. Pedagogical content knowledge and preparation of high school physics teachers // Physical review special topics - physics education research. — 2010. — aug. — Vol. 6, no. 2. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.6.020110>.
9. Limiting case analysis in an electricity and magnetism course / Gary White [et al.] // Physical review physics education research. — 2023. — apr. — Vol. 19, no. 1. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.19.010125>.


10. Detecting preservice teachers' visual attention under prediction and nonprediction conditions with eye-tracking technology / Qiuye Li [et al.] // Physical review physics education research. — 2022. — apr. — Vol. 18, no. 1. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.18.010134>.
11. Characterizing pedagogical practices of university physics students in informal learning environments / Kathleen A. Hinko [et al.] // Physical review physics education research. — 2016. — feb. — Vol. 12, no. 1. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.12.010111>.
12. Evaluating the impact of a classroom simulator training on graduate teaching assistants' instructional practices and undergraduate student learning / Tong Wan [et al.] // Physical review physics education research. — 2021. — jun. — Vol. 17, no. 1. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.17.010146>.
13. Group dynamics in inquiry-based labs: gender inequities and the efficacy of partner agreements / Matthew Dew [et al.] // Physical review physics education research. — 2024. — apr. — Vol. 20, no. 1. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.20.010121>.
14. Cilligol Karabey Sinem, Karaman Selcuk. Identifying pedagogical design and implementation of synchronous virtual classrooms // The international review of research in open and distributed learning. — 2024. — may. — Vol. 25, no. 2. — P. 132–154. — URL: <http://dx.doi.org/10.19173/irrodl.v25i2.7584>.
15. Pedagogical design in the design of e-courses / J. N. Kuznetsova [et al.] // Modern high technologies. — 2021. — Vol. 1, no. 12. — P. 162–167. — URL: <http://dx.doi.org/10.17513/snt.38970>.
16. Designing e-learning courses for classroom and distance learning in physics: the role of learning tasks / Daniel Laumann [et al.] // Physical review physics education research. — 2024. — feb. — Vol. 20, no. 1. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.20.010107>.
17. Pedagogical design as a tool to increase students' learning motivation during distance learning / Altynai Beisembayeva [et al.] // Open education studies. — 2023. — jan. — Vol. 5, no. 1. — URL: <http://dx.doi.org/10.1515/edu-2022-0211>.
18. du Preez Isabella, Jacobs Lynette. Pedagogical and visual design principles for online learning material: insights from quality guiding documents in diverse educational contexts // Interactive learning environments. — 2025. — jul. — P. 1–17. — URL: <http://dx.doi.org/10.1080/10494820.2025.2523390>.

Сведения об авторах:

Эльяна Акифовна Юсифова — студент факультета физико-математического и технологического образования ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», Ульяновск, Россия.

E-mail: alyana.yusifova@mail.ru

ORCID iD  0009-0005-6536-2082

Web of Science ResearcherID  JRW-6185-2023

Original article
PACS 01.40.Di
OCIS 000.2060
MSC 97U70

Investigation of the methodology of pedagogical design of distance courses

E. A. Yusifova 

Ulyanovsk State Pedagogical University, 432071, Ulyanovsk, Russia

Submitted February 17, 2026
Resubmitted February 19, 2026
Published March 31, 2026

Abstract. The relevance of this work stems from the introduction of digital technologies into education, which require a rethinking of distance learning course design methods. The goal is to develop and experimentally test a methodology for the pedagogical design of distance learning physics courses that integrates physics laboratories, interactive simulations, and robotic microcontroller systems. The motivation for this study was the observed decline in student motivation in the remote format and the need to maintain the laboratory component of physics and mathematics education. The methods used included a comparative analysis of digital platforms and pedagogical course design.

Keywords: distance learning course, pedagogical design, methodology, physics laboratory, course design, microcontroller complex

References

1. Kustusch Mary Bridget, Manogue Corinne, Price Edward. Design tactics in curriculum development: examples from the paradigms in physics ring cycle // Physical review physics education research. — 2020. — dec. — Vol. 16, no. 2. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.16.020145>.
2. French Rica Sirbaugh, Prather Edward E. From a systematic investigation of faculty-produced think-pair-share questions to frameworks for characterizing and developing fluency-inspiring activities // Physical review physics education research. — 2020. — dec. — Vol. 16, no. 2. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.16.020138>.
3. Lasry Nathaniel, Charles Elizabeth, Whittaker Chris. When teacher-centered instructors are assigned to student-centered classrooms // Physical review special topics - physics education research. — 2014. — may. — Vol. 10, no. 1. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.10.010116>.
4. Leveraging generative artificial intelligence for simulation-based physics experiments: a new approach to virtual learning about the real world / Yossi Ben-Zion [et al.] // Physical review physics education research. — 2026. — jan. — Vol. 22, no. 1. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/s8dy-kqy5>.

5. Kapon Shulamit, Merzel Avraham. Content-specific pedagogical knowledge, practices, and beliefs underlying the design of physics lessons: a case study // Physical review physics education research. — 2019. — may. — Vol. 15, no. 1. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.15.010125>.
6. Gaffney Jon D. H., Gaffney Amy L. Housley, Beichner Robert J. Do they see it coming? Using expectancy violation to gauge the success of pedagogical reforms // Physical review special topics - physics education research. — 2010. — feb. — Vol. 6, no. 1. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.6.010102>.
7. Design of an assessment to probe teachers' content knowledge for teaching: An example from energy in high school physics / Eugenia Etkina [et al.] // Physical review physics education research. — 2018. — may. — Vol. 14, no. 1. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.14.010127>.
8. Etkina Eugenia. Pedagogical content knowledge and preparation of high school physics teachers // Physical review special topics - physics education research. — 2010. — aug. — Vol. 6, no. 2. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.6.020110>.
9. Limiting case analysis in an electricity and magnetism course / Gary White [et al.] // Physical review physics education research. — 2023. — apr. — Vol. 19, no. 1. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.19.010125>.
10. Detecting preservice teachers' visual attention under prediction and nonprediction conditions with eye-tracking technology / Qiuye Li [et al.] // Physical review physics education research. — 2022. — apr. — Vol. 18, no. 1. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.18.010134>.
11. Characterizing pedagogical practices of university physics students in informal learning environments / Kathleen A. Hinko [et al.] // Physical review physics education research. — 2016. — feb. — Vol. 12, no. 1. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.12.010111>.
12. Evaluating the impact of a classroom simulator training on graduate teaching assistants' instructional practices and undergraduate student learning / Tong Wan [et al.] // Physical review physics education research. — 2021. — jun. — Vol. 17, no. 1. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.17.010146>.
13. Group dynamics in inquiry-based labs: gender inequities and the efficacy of partner agreements / Matthew Dew [et al.] // Physical review physics education research. — 2024. — apr. — Vol. 20, no. 1. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.20.010121>.
14. Cilligol Karabey Sinem, Karaman Selcuk. Identifying pedagogical design and implementation of synchronous virtual classrooms // The international review of research in open and distributed learning. — 2024. — may. — Vol. 25, no. 2. — P. 132–154. — URL: <http://dx.doi.org/10.19173/irrodl.v25i2.7584>.
15. Pedagogical design in the design of e-courses / J. N. Kuznetsova [et al.] // Modern high technologies. — 2021. — Vol. 1, no. 12. — P. 162–167. — URL: <http://dx.doi.org/10.17513/snt.38970>.

16. Designing e-learning courses for classroom and distance learning in physics: the role of learning tasks / Daniel Laumann [et al.] // Physical review physics education research. — 2024. — feb. — Vol. 20, no. 1. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.20.010107>.
17. Pedagogical design as a tool to increase students' learning motivation during distance learning / Altynai Beisembayeva [et al.] // Open education studies. — 2023. — jan. — Vol. 5, no. 1. — URL: <http://dx.doi.org/10.1515/edu-2022-0211>.
18. du Preez Isabella, Jacobs Lynette. Pedagogical and visual design principles for on-line learning material: insights from quality guiding documents in diverse educational contexts // Interactive learning environments. — 2025. — jul. — P. 1–17. — URL: <http://dx.doi.org/10.1080/10494820.2025.2523390>.

Information about authors:

Elyana Akifovna Yusifova — 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: alyana.yusifova@mail.ru

ORCID iD  0009-0005-6536-2082

Web of Science ResearcherID  JRW-6185-2023

Авторский указатель

Алтунин, К. К., 22
Джаббарова, А. Ш., 48
Илюшкина, Е. А., 58

Родионова, А. А., 1
Тимченко, В. М., 37
Юсифова, Э. А., 66

Index of authors

Altunin, K. K., 22

Dzhabbarova, A. Sh., 48

Ilyushkina, E. A., 58

Rodionova, A. A., 1

Timchenko, V. M., 37

Yusifova, E. A., 66

