

ISSN 2712-8326



HAYKA ONLINE SCIENCE ONLINE

Сетевое издание
№ 3 (32) | 2025

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

НАУКА ONLINE, № 3 (32), 2025.

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

ISSN 2712-8326

Выходит 4 раза в год.

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

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 3 (32), 2025.

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

ISSN 2712-8326

Published 4 times a year.

Founder: Ulyanovsk State 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 СМАРТ-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, профессор кафедры высшей математики, заведующий научно-исследовательской лабораторией математического моделирования 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 кафедры 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

Компьютерные науки и информатика	1
Теоретическая информатика	1
1 Разработка дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов <i>А. С. Акимова</i>	
14 Разработка онлайн-курса по физическим основам нанотехнологий <i>П. П. Карасева</i>	
25 Разработка дистанционного курса по оптическим нанотехнологиям <i>А. Д. Селюкова</i>	
Физические науки	45
Оптика	45
45 Моделирование физических свойств структур спинтроники <i>К. К. Алтунин</i>	
Теоретическая физика	65
65 Моделирование задач авиационной динамики и оптимизации параметров летательных аппаратов в современной авиации <i>А. В. Синдяев</i>	
Науки о Земле и окружающей среде	78
Экономическая, социальная, политическая и рекреационная география	78
78 Геосистемный подход в региональных исследованиях инфраструктуры Приволжского федерального округа <i>В. Н. Федоров</i>	
Авторский указатель	92

CONTENTS

Computer science and information science	1
Theoretical computer science	1
1 Development of a distance learning course on the technology of manufacturing bulk nanomaterials <i>A. S. Akimova</i>	
14 Development of an online course on the physical foundations of nanotechnology <i>P. P. Karaseva</i>	
25 Development of a distance learning course on optical nanotechnology <i>A. D. Selukova</i>	
Physical sciences	45
Optics	45
45 Modeling the physical properties of spintronic structures <i>A. D. Selyukova</i>	
Theoretical physics	65
65 Modeling of aircraft dynamics problems and optimization of aircraft parameters in modern aviation <i>A. V. Sindyaev</i>	
Earth and environmental sciences	78
Economic, social, political and recreational geography	78
78 Geosystemic approach in regional studies of infrastructure of the Volga Federal District <i>V. N. Fedorov</i>	
Author's index	93

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.

PACS 01.40.Di

OCIS 000.2060

MSC 00A79

Разработка дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов

А. С. Акимова  ¹

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

Поступила в редакцию 15 июля 2025 года

После переработки 17 июля 2025 года

Опубликована 30 сентября 2025 года

Аннотация. Представлены результаты разработки дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов. Структура и содержание дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов обеспечивают комплексное и систематическое изложение основных технологий изготовления объёмных наноматериалов. Разработанный дистанционный курс обеспечивает эффективное обучение технологии изготовления объёмных наноматериалов.

Ключевые слова: наноматериал, объёмный наноматериал, курс, дистанционный курс, система управления обучением

¹E-mail: annaakimova028@gmail.com

Введение

Современные нанотехнологии играют ключевую роль в развитии материаловедения, электроники, медицины и энергетики. Однако доступ к качественному образованию в этой области ограничен, особенно в удалённых регионах. Разработка дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов призвана решить эту проблему, обеспечив широкий доступ к актуальным знаниям по технологии изготовления объёмных наноматериалов и практическим навыкам в области наноинженерии. Современные технологии производства наноматериалов требуют специалистов с глубокими знаниями в области наноинженерии. Развитие дистанционного обучения в области нанотехнологий способствует повышению доступности образования и подготовке квалифицированных кадров для высокотехнологичных отраслей промышленности. Однако доступ к качественному образованию в этой сфере ограничен, что обуславливает необходимость разработки дистанционных курсов. Рост спроса на специалистов в области нанотехнологий и необходимость доступного образования обуславливают важность разработки дистанционного образовательного курса, посвящённого технологии изготовления объёмных наноматериалов.

Объёмные наноматериалы представляют собой материалы, обладающие наноструктурными элементами размером менее 100 нм во всех трёх измерениях. Уникальные физические свойства объёмных наноматериалов определяются высокой плотностью границ зёрен, наноразмерными эффектами развитой поверхностью. Современные технологии изготовления объёмных наноматериалов требуют точного контроля параметров синтеза, включая температуру, давление, время обработки и химический состав. Оптимизация процессов позволяет добиваться улучшенных механических, термических и функциональных свойств.

Целью работы является разработка дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов, направленного на освоение технологий синтеза и обработки объёмных наноматериалов, с использованием современных образовательных методик для обеспечения усвоения теоретических и практических знаний по технологии изготовления объёмных наноматериалов.

Для достижения указанной цели в работе поставлены следующие задачи:

1. написание обзора литературы по дистанционным курсам о технологиях производства наноматериалов,
2. разработка модульной структуры курса, включающей теоретические модули по технологии изготовления объёмных наноматериалов,
3. разработка системы контроля теоретических знаний по технологии изготовления объёмных наноматериалов в рамках дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов.

Объектом исследования является процесс курс по технологии изготовления объёмных наноматериалов. Предметом исследования является процесс разработки дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов в системе управления обучением MOODLE.

Методы исследования включают следующие методы: анализ научной литературы по нанотехнологиям, компьютерные методы проектирования дистанционных курсов в системе управления обучением MOODLE. Материалы исследования включают научные публикации по нанотехнологиям, системе управления обучением MOODLE.

Научная новизна исследования заключается в том, что впервые предложена уникальная модульная структура дистанционного курса, сочетающая теорию и систему контроля теоретических знаний по технологии изготовления объёмных наноматериалов.

Гипотеза научного исследования заключается в том, что если применять современные образовательные технологии в дистанционном курсе по технологии изготовления объёмных наноматериалов, то можно повысить эффективность усвоения теоретического материала при интенсивном использовании системы контроля теоретических знаний в дистанционном курсе.

Теоретическая значимость исследования заключается в том, что исследование вносит вклад в развитие методики дистанционного обучения в области нанотехнологий, систематизирует подходы к преподаванию современных технологий синтеза объёмных наноматериалов. Практическая значимость исследования заключается в том, что создан готовый к внедрению дистанционный курс, который может быть адаптирован для внедрения в образовательные программы других вузов.

Обзор научных работ по дистанционным курсам о технологиях производства наноматериалов

Дистанционные курсы обучения наноматериалам могут эффективно интегрировать теоретические знания с практическими приложениями, как показывают различные образовательные методики. Например, однонедельный гибридный курс объединяет лекции с практическими лабораторными экспериментами, уделяя особое внимание социальным воздействиям и методам характеристики наноматериалов [1]. В статье [1] обсуждается однонедельный межсессионный лекционно-лабораторный гибридный курс, который сочетает теоретические основы и практические лабораторные эксперименты для обучения студентов наноматериалам и их общественному влиянию. Новый однонедельный межсессионный лекционно-лабораторный гибридный курс по наноматериалам предоставил комбинацию фоновой теории и практических лабораторных экспериментов для обучения студентов наноматериалам и нанотехнологиям. Кроме того, такие образовательные платформы улучшают обучение, предоставляя вычислительные ресурсы для моделирования нанoeлектронных приборов и устройств, тем самым повышая вовлечённость студентов и понимание сложных концепций [2]. В статье [2] обсуждается образовательная методология с использованием nanoHUB.org для обучения наноматериалам, в частности, в курсе по электронным материалам. Она включает практические лабораторные упражнения и мультимедийные ресурсы, улучшая понимание студентами наноматериалов и устройств посредством дистанционного обучения. Образовательная методология, которая использует вычислительные ресурсы, доступные на онлайн-платформе исследований и образования nanoHUB.org, для улучшения понимания студентами теоретических концепций, связанных с нанoeлектронными материалами и устройствами, тем самым становясь более мотивированными и удовлетворёнными. Фундаментальные свойства наноматериалов, такие как размерные эффекты и уникальные характеристики, имеют решающее значение для их применения в различных областях, включая медицину, электронику и науку об окружающей среде [3]. В работе [4] разработаны дистанционно управляемый сканирующий зондовый микроскоп, галерея визуализации изображений и ряд образовательных модулей с темами материалов в рамках веб-доступного модуля для студентов, чтобы исследовать наноматериалы с помощью учебных занятий на основе открытий, используя дистанционно управляемый сканирующий зондовый микроскоп для проведения экспериментов и улучшения их понимания концепций материаловедения. Поскольку нанотехнологии продолжают развиваться, спрос на комплексные образовательные ресурсы, которые охватывают как научные, так и практические аспекты наноматериалов, становится всё более важным.

Результаты разработки дистанционного курса

Опишем основные результаты разработки тематической структуры дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов в системе управления обучением MOODLE.

Базой исследования для создания дистанционного курса по дисциплине “Технология изготовления объёмных наноматериалов” в системе управления обучением MOODLE является образовательный портал ФГБОУ ВО «УлГПУ им. И. Н. Ульянова».

Тема 1 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящена введению в нанотехнологию и изучению основных постулатов нанотехнологии и нанодиагностики. Тема 2 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящена изучению наноматериалов и их классификация, материалов наносистемной техники, структуры наноматериалов, типов консолидированных наноматериалов. Тема 3 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящена изучению методов исследования и диагностика наноматериалов, нанообъектов и наносистем. Тема 4 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящена изучению методов получения металлосодержащих наноразмерных частиц. Тема 5 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящена изучению гибридных и супрамолекулярных материалов, нанопористых материалов, трубчатых материалов, полимерных материалов, полученных методом самосборки. Тема 6 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящена изучению атомно-зондовых нанотехнологий, нанозондового сверхлокального синтеза и модифицирования. Тема 7 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящена изучению технологии получения органических нанослойных композиций методом Ленгмюра-Блоджетт. Тема 8 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящена изучению размерных и функциональных свойств изолированных наночастиц и нанокристаллических порошков. Тема 9 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящена изучению микроструктуры компактных нанокристаллических материалов. Тема 10 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящена изучению квантовой механики наносистем. Тема 11 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящена изучению электропроводимости нанообъектов. Тема 12 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящена изучению фазового равновесия и термодинамики нанообъектов. Тема 13 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящена изучению реакционной способности и катализа. Тема 14 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящена изучению синергетики, самоорганизации и фрактальной геометрии нанообъектов. Тема 15 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящена изучению теории матричного синтеза, сборки, самосборки и молекулярного узнавания для веществ органической и неорганической природы. Тема 16 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящена изучению технологии производства объёмных наноматериалов для наноприборов, наномашин, наносистем. Тема 17 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящена изучению объёмных наноструктурных материалов и конструктивных объёмных наноматериалов. Тема 18 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящена изучению технологии получения нанопористых материалов. Тема 19 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящена изучению порошковых технологий компактирования материалов. Тема 20 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных нано-

материалов посвящена изучению технологии получения полимерных композиционных наноматериалов. Тема 21 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящена изучению технологии получения волокнистых композиционных материалов. Тема 22 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящена изучению технологии производства молекулярных устройств. Тема 23 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящена изучению механических свойств пористых и дисперсных систем. Тема 24 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящена изучению области применения наноматериалов и нанобиотехнологии.

Процесс создания структуры и элементов курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов на результаты анализа элементов других дистанционных курсов по аналогичной тематике [5–13]. В результате выполнения самостоятельной части работы созданы элементы курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов.

Приведём описание результатов разработки структуры и элементов дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов в системе управления обучением MOODLE.

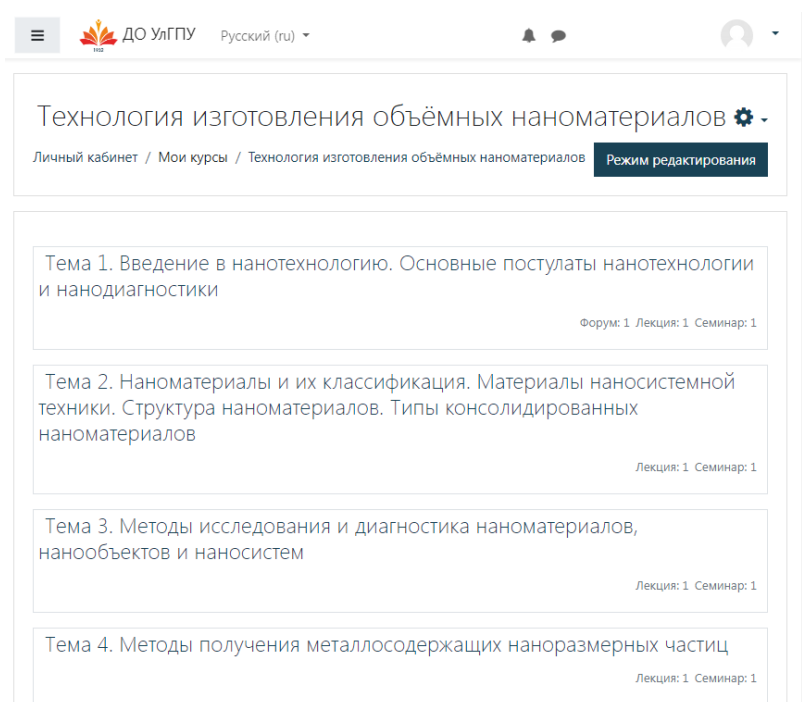


Рис. 1. Страница тематических модулей первой части дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 1 приведено изображение страницы тематических модулей первой части дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 2 приведено изображение страницы тематических модулей второй части дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 3 приведено изображение страницы тематических модулей третьей части дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 4 приведено изображение страницы тематических модулей четвёртой части дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов, со-

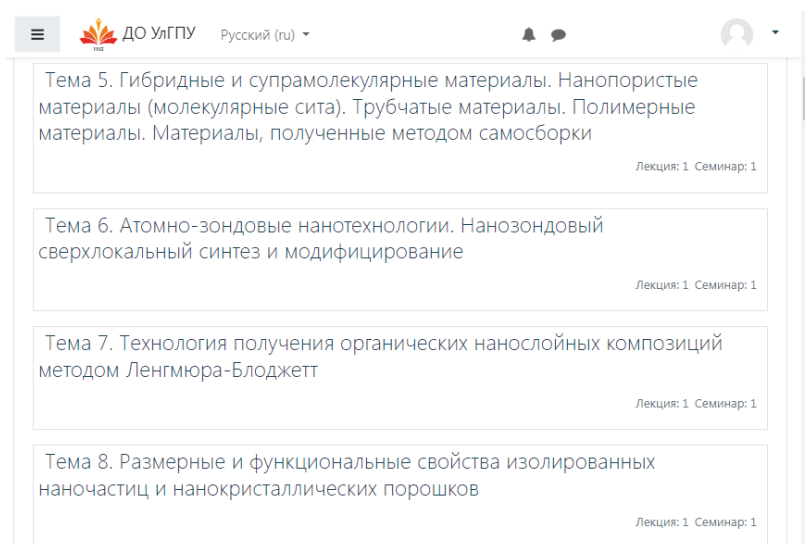


Рис. 2. Страница тематических модулей второй части дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

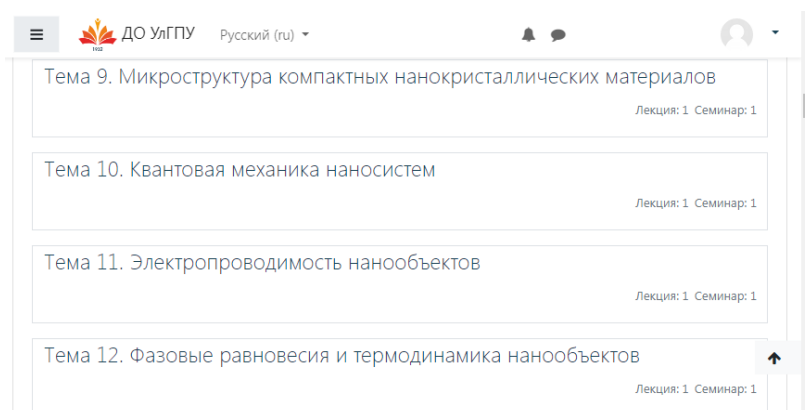


Рис. 3. Страница тематических модулей третьей части дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

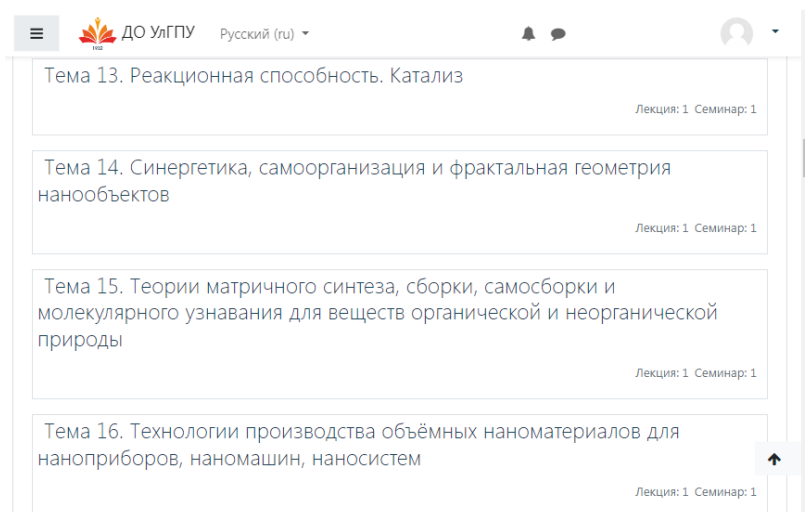


Рис. 4. Страница тематических модулей четвёртой части дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

зданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

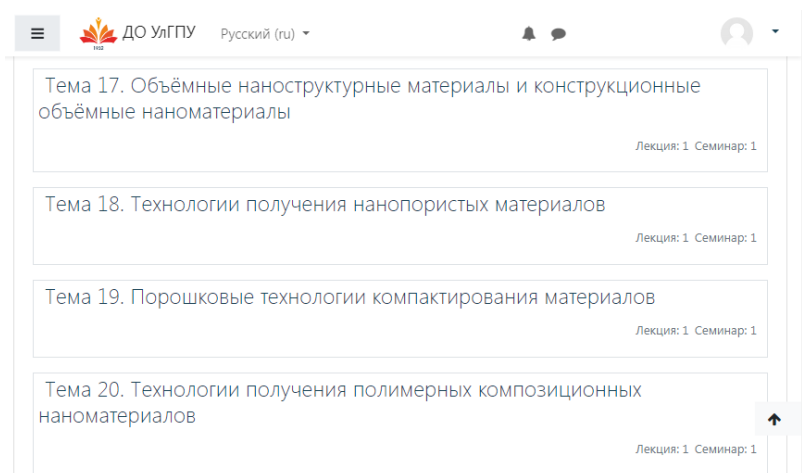


Рис. 5. Страница тематических модулей пятой части дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 5 приведено изображение страницы тематических модулей пятой части дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

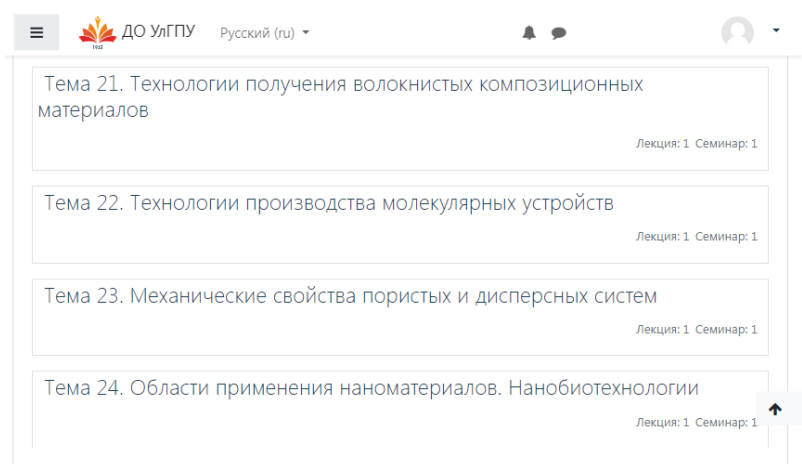


Рис. 6. Страница тематических модулей шестой части дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 6 приведено изображение страницы тематических модулей шестой части дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

Лекция 1 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящена введению в нанотехнологию и изучению основных постулатов нанотехнологии и нанодиагностики. Лекция 2 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящена изучению наноматериалов и их классификация, материалов наносистемной техники, структуры наноматериалов, типов консолидированных наноматериалов. Лекция 3 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящена изучению методов исследования и

диагностика наноматериалов, нанообъектов и наносистем. Лекция 4 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящена изучению методов получения металлосодержащих наноразмерных частиц. Лекция 5 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящена изучению гибридных и супрамолекулярных материалов, нанопористых материалов, трубчатых материалов, полимерных материалов, материалов, полученных методом самосборки. Лекция 6 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящена изучению атомно-зондовых нанотехнологий, нанозондового сверхлокального синтеза и модифицирования. Лекция 7 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящена изучению технологии получения органических нанослойных композиций методом Ленгмюра-Блоджетт. Лекция 8 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящена изучению размерных и функциональных свойств изолированных наночастиц и нанокристаллических порошков. Лекция 9 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящена изучению микроструктуры компактных нанокристаллических материалов. Лекция 10 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящена изучению квантовой механики наносистем. Лекция 11 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящена изучению электропроводимости нанообъектов. Лекция 12 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящена изучению фазового равновесия и термодинамики нанообъектов. Лекция 13 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящена изучению реакционной способности и катализа. Лекция 14 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящена изучению синергетики, самоорганизации и фрактальной геометрии нанообъектов. Лекция 15 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящена изучению теории матричного синтеза, сборки, самосборки и молекулярного узнавания для веществ органической и неорганической природы. Лекция 16 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящена изучению технологии производства объёмных наноматериалов для наноприборов, наномашин, наносистем. Лекция 17 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящена изучению объёмных наноструктурных материалов и конструкционных объёмных наноматериалов. Лекция 18 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящена изучению технологии получения нанопористых материалов. Лекция 19 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящена изучению порошковых технологий компактирования материалов. Лекция 20 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящена изучению технологии получения полимерных композиционных наноматериалов. Лекция 21 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящена изучению технологии получения волокнистых композиционных материалов. Лекция 22 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящена изучению технологии производства молекулярных устройств. Лекция 23 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящена изучению механических свойств пористых и дисперсных систем. Лекция 24 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящена изучению области применения наноматериалов и нанобиотехнологии.

Семинар 1 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящён обсуждению введения в нанотехнологию и изучению основных постулатов нанотехнологии и нанодиагностики. Семинар 2 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящён обсуждению наноматериалов

и их классификации, материалов наносистемной техники, структуры наноматериалов, типов консолидированных наноматериалов. Семинар 3 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящён обсуждению методов исследования и диагностика наноматериалов, нанообъектов и наносистем. Семинар 4 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящён обсуждению методов получения металлосодержащих наноразмерных частиц. Семинар 5 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящён обсуждению гибридных и супрамолекулярных материалов, нанопористых материалов, трубчатых материалов, полимерных материалов, материалов, полученных методом самосборки. Семинар 6 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящён обсуждению атомно-зондовых нанотехнологий, нанозондового сверхлокального синтеза и модифицирования. Семинар 7 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящён обсуждению технологии получения органических нанослойных композиций методом Ленгмюра-Блоджетт. Семинар 8 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящён обсуждению размерных и функциональных свойств изолированных наночастиц и нанокристаллических порошков. Семинар 9 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящён обсуждению микроструктуры компактных нанокристаллических материалов. Семинар 10 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящён обсуждению квантовой механики наносистем. Семинар 11 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящён обсуждению электропроводимости нанообъектов. Семинар 12 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящён обсуждению фазового равновесия и термодинамики нанообъектов. Семинар 13 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящён обсуждению реакционной способности и катализа. Семинар 14 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящён обсуждению синергетики, самоорганизации и фрактальной геометрии нанообъектов. Семинар 15 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящён обсуждению теории матричного синтеза, сборки, самосборки и молекулярного узнавания для веществ органической и неорганической природы. Семинар 16 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящён обсуждению технологии производства объёмных наноматериалов для наноприборов, наномашин, наносистем. Семинар 17 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящён обсуждению объёмных наноструктурных материалов и конструкционных объёмных наноматериалов. Семинар 18 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящён обсуждению технологии получения нанопористых материалов. Семинар 19 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящён обсуждению порошковых технологий компактирования материалов. Семинар 20 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящён обсуждению технологии получения полимерных композиционных наноматериалов. Семинар 21 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящён обсуждению технологии получения волокнистых композиционных материалов. Семинар 22 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящён обсуждению технологии производства молекулярных устройств. Семинар 23 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящён обсуждению механических свойств пористых и дисперсных систем. Семинар 24 дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов посвящён обсуждению области применения наноматериалов и нанобиотехнологии.

Дистанционный курс по технологии изготовления объёмных наноматериалов является актуальным и востребованным в современном образовательном пространстве, поскольку нанотехнологии играют ключевую роль в развитии многих отраслей науки и техники. Структура и содержание дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов обеспечивают комплексное и систематическое изложение основных технологий изготовления объёмных наноматериалов. Использование современных образовательных технологий, таких как интерактивные задания, видеоматериалы, презентации и онлайн-тестирование, позволяет сделать процесс обучения более эффективным и привлекательным для студентов. Включение в курс информации о последних достижениях и тенденциях в области технологии изготовления объёмных наноматериалов стимулирует интерес студентов к данной тематике и способствует их профессиональному росту.

Заключение

Исследование вносит вклад в развитие методики дистанционного обучения в области нанотехнологий, систематизирует подходы к преподаванию современных технологий синтеза объёмных наноматериалов.

Выводы по работе можно сформулировать следующим образом:

1. проведённый анализ литературы показал актуальность темы исследования,
2. разработанный курс обеспечивает эффективное обучение технологии изготовления объёмных наноматериалов,
3. разработанная система контроля знаний курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов обеспечивает эффективный контроль знаний студентов.

В результате работы создан готовый к внедрению дистанционный курс по технологии изготовления объёмных наноматериалов, который может быть адаптирован для внедрения в образовательные программы других вузов. Разработанный дистанционный курс по технологии изготовления объёмных наноматериалов свою эффективность и может быть масштабирован в высших образовательных учреждениях.

Гипотеза исследования, состоящая в том, что если применять современные образовательные технологии в дистанционном курсе по технологии изготовления объёмных наноматериалов, то можно повысить эффективность усвоения теоретического материала при интенсивном использовании системы контроля теоретических знаний в дистанционном курсе, подтверждена полностью.

Задачи работы решены полностью.

Показано, что дистанционный курс по технологии изготовления объёмных наноматериалов является актуальным и востребованным в современном образовательном пространстве, поскольку нанотехнологии играют ключевую роль в развитии многих отраслей науки и техники. Структура и содержание дистанционного курса по технологии изготовления объёмных наноматериалов обеспечивают комплексное и систематическое изложение основных технологий изготовления объёмных наноматериалов.

Список использованных источников

1. Walters Keith A., Bullen Heather A. Development of a nanomaterials one-week inter-session course // Journal of chemical education. — 2008. — oct. — Vol. 85, no. 10. — P. 1406. — URL: <http://dx.doi.org/10.1021/ED085P1406>.
2. de la Rosa Jose M. Using nanoHUB.org for teaching and learning nanoelectronic devices in materials engineering // Proceedings of the 2012 IEEE global engineering education conference (EDUCON). — IEEE, 2012. — apr. — P. 1–4. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/EDUCON.2012.6201018>.

3. Filella M. Nanomaterials // Comprehensive sampling and sample preparation. — Elsevier, 2012. — P. 109–124. — ISBN: 9780123813749. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-381373-2.00032-6>.
4. Learning materials science via the web using nanospheres and scanning probe microscopes / Eddie W. Ong [et al.] // MRS Proceedings. — 2000. — Vol. 632. — URL: <http://dx.doi.org/10.1557/PROC-PROC-632-HH7.5>.
5. Карасева П. П. Разработка онлайн-курса по физике наносистем и наноустройств в современных технологиях // Наука online. — 2024. — № 3 (28). — С. 39–51. — URL: <http://nauka-online.ru/wp-content/uploads/2024/09/03282024-003.pdf>.
6. Алтуний К. К., Колесова Т. А. Разработка элементов дистанционного курса по физической наноэлектронике в системе управления обучением MOODLE // Наука online. — 2022. — № 1 (18). — С. 88–112. — URL: <https://elibrary.ru/dutumg>.
7. Алтуний К. К., Шленкина Е. А. Разработка информационной системы поддержки изучения темы по оптике метаматериалов в составе курса по нанооптике // Наука online. — 2022. — № 2 (19). — С. 75–88. — URL: <https://elibrary.ru/pticsm>.
8. Алтуний К. К., Лебедев А. А. Разработка дистанционного курса по нанофизике в системе управления обучением MOODLE // Наука online. — 2022. — № 2 (19). — С. 60–74. — URL: <https://elibrary.ru/mpcxsb>.
9. Алтуний К. К., Сорокина Е. О. Разработка материалов занятия по оптике нанокompозитных материалов в курсе по оптике тонкослойных и наноструктурных покрытий // Наука online. — 2022. — № 2 (19). — С. 18–30. — URL: <https://elibrary.ru/wgfhkb>.
10. Алтуний К. К. Разработка компьютерного сопровождения изучения темы по спайзерам в курсе нанооптики // Наука online. — 2018. — № 4 (5). — С. 74–93. — URL: <https://elibrary.ru/pvxfxn>.
11. Алтуний К. К., Петрова Е. А. Разработка модульной структуры дистанционного курса «Оптика метаматериалов» в системе управления обучением MOODLE // Наука online. — 2019. — № 1 (6). — С. 50–70. — URL: <https://elibrary.ru/pgpsft>.
12. Алтуний К. К., Карташова А. А. Разработка электронного образовательного ресурса по солнечной энергетике // Наука online. — 2019. — № 2 (7). — С. 15–32. — URL: <https://elibrary.ru/omnoyk>.
13. Сорокина Е. С. Результаты создания сайта по электрическим явлениям в курсе физики основной школы // Наука online. — 2022. — № 3 (20). — С. 109–124. — URL: <http://nauka-online.ru/wp-content/uploads/2023/01/03202022-007.pdf>.

Сведения об авторах:

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

E-mail: annaakimova028@gmail.com

ORCID iD  0000-0002-3677-4265

Web of Science ResearcherID  HNMV-0785-2023

Original article
 PACS 01.40.Di
 OCIS 000.2060
 MSC 00A79

Development of a distance learning course on the technology of manufacturing bulk nanomaterials

A. S. Akimova 

Ulyanovsk State Pedagogical University, 432071, Ulyanovsk, Russia

Submitted July 15, 2025

Resubmitted July 17, 2025

Published September 30, 2025

Abstract. The results of the development of a distance learning course on the technology of manufacturing bulk nanomaterials are presented. The structure and content of the distance learning course on the technology of manufacturing bulk nanomaterials provide a comprehensive and systematic presentation of the main technologies of manufacturing bulk nanomaterials. The developed distance learning course ensures effective training in the technology of manufacturing bulk nanomaterials.

Keywords: nanomaterial, bulk nanomaterial, course, distance learning course, learning management system

References

1. Walters Keith A., Bullen Heather A. Development of a nanomaterials one-week inter-session course // Journal of chemical education. — 2008. — oct. — Vol. 85, no. 10. — P. 1406. — URL: <http://dx.doi.org/10.1021/ED085P1406>.
2. de la Rosa Jose M. Using nanoHUB.org for teaching and learning nanoelectronic devices in materials engineering // Proceedings of the 2012 IEEE global engineering education conference (EDUCON). — IEEE, 2012. — apr. — P. 1–4. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/EDUCON.2012.6201018>.
3. Filella M. Nanomaterials // Comprehensive sampling and sample preparation. — Elsevier, 2012. — P. 109–124. — ISBN: 9780123813749. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-381373-2.00032-6>.
4. Learning materials science via the web using nanospheres and scanning probe microscopes / Eddie W. Ong [et al.] // MRS Proceedings. — 2000. — Vol. 632. — URL: <http://dx.doi.org/10.1557/PROC-PROC-632-HH7.5>.
5. Karaseva P. P. Development of an online course on the physics of nanosystems and nanodevices in modern technologies // Nauka online. — 2024. — no. 3 (28). — P. 39–51. — URL: <http://nauka-online.ru/wp-content/uploads/2024/09/03282024-003.pdf>.
6. Altunin K. K., Kolesova T. A. Development of elements of a distance learning course on physical nanoelectronics in the learning management system MOODLE // Science Online. — 2022. — no. 1 (18). — P. 88–112. — URL: <https://elibrary.ru/dutung>.

7. Altunin K. K., Shlenkina E. A. Development of an information system to support the study of the topic of metamaterials as part of a course on nanooptics // Science online. — 2022. — no. 2 (19). — P. 75–88. — URL: <https://elibrary.ru/pticsm>.
8. Altunin K. K., Lebedev A. A. Development of a distance learning course on nanophysics in the learning management system MOODLE // Science online. — 2022. — no. 2 (19). — P. 60–74. — URL: <https://elibrary.ru/mpcxsb>.
9. Altunin K. K., Sorokina E. O. Development of lesson materials on the optics of nanocomposite materials in a course on the optics of thin-film and nanostructured coatings // Science online. — 2022. — no. 2 (19). — P. 18–30. — URL: <https://elibrary.ru/wgfhkb>.
10. Altunin K. K. Development of computer support for studying the topic of spasers in a course on nanooptics // Science online. — 2018. — no. 4 (5). — P. 74–93. — URL: <https://elibrary.ru/pvxfxn>.
11. Altunin K. K., Petrova E. A. Development of a modular structure for the distance learning course “Optics of metamaterials” in the learning management system MOODLE // Science online. — 2019. — no. 1 (6). — P. 50–70. — URL: <https://elibrary.ru/pgpsft>.
12. Altunin K. K., Kartashova A. A. Development of an electronic educational resource on solar energy // Nauka online. — 2019. — no. 2 (7). — P. 15–32. — URL: <https://elibrary.ru/omnoyk>.
13. Sorokina E. S. Results of creating a website on electrical phenomena in a basic school physics course // Science online. — 2022. — no. 3 (20). — P. 109–124. — URL: <http://nauka-online.ru/wp-content/uploads/2023/01/03202022-007.pdf>.

Information about authors:

Anna Sergeevna Akimova — 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: annaakimova028@gmail.com

ORCID iD  0000-0002-3677-4265

Web of Science ResearcherID  H MV-0785-2023

Научная статья
УДК 004.77
ББК 22.18
ГРНТИ 20.53.23
БАК 1.2.3.
PACS 01.40.Di
OCIS 000.2060
MSC 00A79

Разработка онлайн-курса по физическим основам нанотехнологий

П. П. Карасева  ¹

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

Поступила в редакцию 20 июня 2025 года
После переработки 27 июня 2025 года
Опубликована 30 сентября 2025 года

Аннотация. Описаны результаты разработки онлайн-курса по физическим основам нанотехнологий. Целью исследования является научно-методическое обоснование процесса разработки онлайн-курса по физическим основам нанотехнологий. Представлены результаты разработки модульной структуры онлайн-курса по физическим основам нанотехнологий с учётом особенностей дистанционного обучения в университетах. Представлены результаты разработки избранных элементов содержания онлайн-курса по физическим основам нанотехнологий.

Ключевые слова: нанотехнологии, онлайн-курс, дистанционное обучение, принципы физики наносистем

Введение

Онлайн-курсы предоставляют возможность получить качественное образование в области нанотехнологий без необходимости постоянного посещения учебного заведения, что особенно актуально для студентов, проживающих в отдалённых регионах или имеющих другие обязательства. Использование современных технологий в образовательном процессе способствует повышению мотивации студентов и делает обучение более интересным и эффективным.

Целью исследования является научно-методическое обоснование процесса разработки онлайн-курса по физическим основам нанотехнологий, который будет способствовать формированию у студентов базовых знаний и навыков в области нанотехнологий.

Для достижения указанной цели в работе поставлены следующие задачи:

1. написать обзор научной литературы по физическим основам нанотехнологий,
2. разработать модульную структуру онлайн-курса по физическим основам нанотехнологий, учитывая особенности дистанционного обучения в университетах,

¹E-mail: karassiic1407@mail.ru

3. разработать избранные элементы содержания онлайн-курса по физическим основам нанотехнологий, учитывая особенности дистанционного обучения в университетах.

Объектом исследования является онлайн-курс физических основ нанотехнологий. Предметом исследования является процесс обучения студентов физике наносистем и наноустройств, изготавливаемых с помощью современных технологий, в рамках онлайн-курса физических основ нанотехнологий.

В качестве метода исследования будет использован аналитический метод к разработке материалов онлайн-курса по физическим основам нанотехнологий, а также метод сравнительного анализа при реализации элементов контроля в составе онлайн-курса по физическим основам нанотехнологий.

Научная новизна исследования состоит в том, что создание комплексного и систематического изложения основных принципов и методов физики наносистем и нанотехнологий, которое ранее не было представлено в таком объёме в онлайн-курсах в области нанотехнологий.

Гипотеза исследования заключается в том, что если применять элементы курса по физическим основам нанотехнологий, то можно построить систему подготовки, которая будет эффективной, а курс по физическим основам нанотехнологий имеет ряд преимуществ перед другими формами обучения.

Теоретическая значимость онлайн-курса по физическим основам нанотехнологий заключается в систематизации и обобщении знаний в области нанотехнологий, изучении их свойств, методов исследования и возможностей применения. Курс способствует формированию критического мышления и навыков самостоятельной работы с научной литературой, а также стимулирует интерес студентов к данной тематике. Кроме того, теоретическая значимость курса заключается в возможности его использования как основы для дальнейшего углубленного изучения нанотехнологий и подготовки специалистов в этой области, а также в интернационализации образования и развитии научных исследований в области нанотехнологий.

Практическая значимость онлайн-курса по физическим основам нанотехнологий заключается в возможности его применения для обучения студентов и специалистов в области нанотехнологий, а также для популяризации научных знаний в этой сфере. Курс также может быть использован для создания и развития образовательных программ в области нанотехнологий, как в рамках высших учебных заведений, так и на уровне дополнительного образования. Кроме того, данный курс может быть полезен для организации научных исследований и разработок в области нанотехнологий, а также для формирования стратегии развития нанотехнологий в различных отраслях промышленности и науки.

Разработка структуры курса физических основ нанотехнологий

Опишем основные результаты разработки модульной структуры курса физических основ нанотехнологий. Общая трудоёмкость курса физических основ нанотехнологий составляет 2 зачётные единицы или 72 часа. Онлайн-курс физических основ нанотехнологий может быть дополнен актуальными сведениями в области нанотехнологий, демонстрацией реальных проектов и кейсов успешных стартапов в области нанотехнологий, а также интерактивными заданиями и тестами для закрепления материала по курсу физики наносистем и наноустройств. Для проведения исследования будет использован комплексный подход, включающий анализ литературы, разработку онлайн-курса физических основ нанотехнологий, проведение педагогического эксперимента и ана-

лиз полученных результатов. Курс включает в себя лекции, практические занятия и семинары. Лекции посвящены основам физики наносистем, квантовой механике, статистической физике, квантовой теории твёрдого тела и другим темам. Практические занятия направлены на развитие навыков решения задач и анализа данных по физическим свойствам наноматериалов. Семинары дают возможность обсудить результаты изучения свойств наносистем. Курс предназначен для студентов, изучающих нанотехнологии и их применение в современных технологиях. Курс поможет углубить знания в области физики наносистем и наноустройств, а также развить навыки работы с наноматериалами и нанотехнологиями. Онлайн-курс физических основ нанотехнологий охватывает следующие темы: общая характеристика наноструктур, наноматериалов и нанотехнологий, особенности термодинамики наноструктур, электрофизические и оптические свойства наноструктур, применение низкоразмерных систем в электронике, технологии получения наноматериалов и наноструктур, методы синтеза наночастиц и компактирования наноматериалов.

Описание элементов курса физических основ нанотехнологий

Процесс создания структуры и элементов курса физических основ нанотехнологий опирался на результаты анализа элементов других дистанционных курсов по аналогичной тематике [1–9]. В результате выполнения самостоятельной части работы созданы элементы курса физических основ нанотехнологий. Приведём описание избранных элементов курса физических основ нанотехнологий.

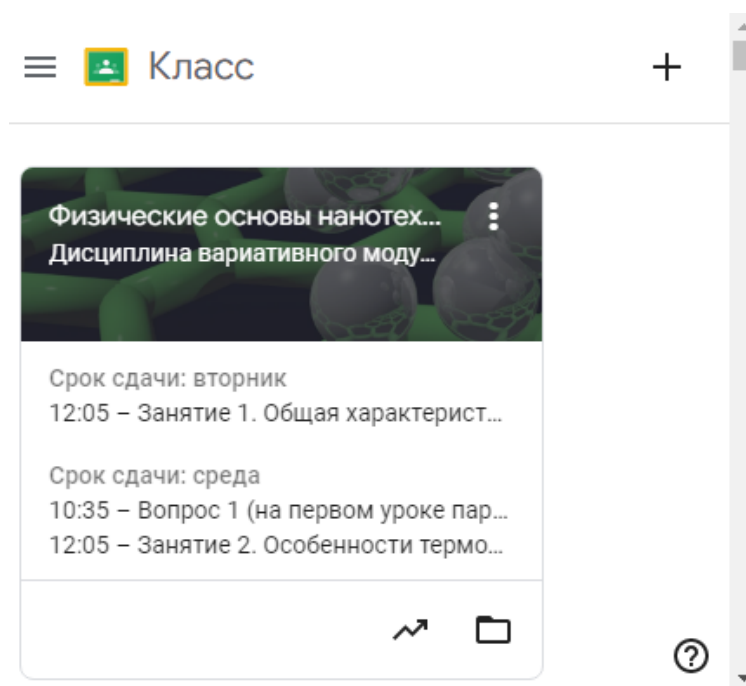


Рис. 1. Входная страница курса физических основ нанотехнологий.

На рис. 1 приведено изображение входной страницы курса физических основ нанотехнологий.

На рис. 2 приведено изображение ленты курса физических основ нанотехнологий.

На рис. 3 приведено изображение страницы элементов первой темы по общей характеристике наноструктур, наноматериалов и нанотехнологий в составе курса физических основ нанотехнологий.

На рис. 4 приведено изображение гипертекстовой страницы элементов второй темы по особенностям термодинамики наноструктур в составе курса физических основ

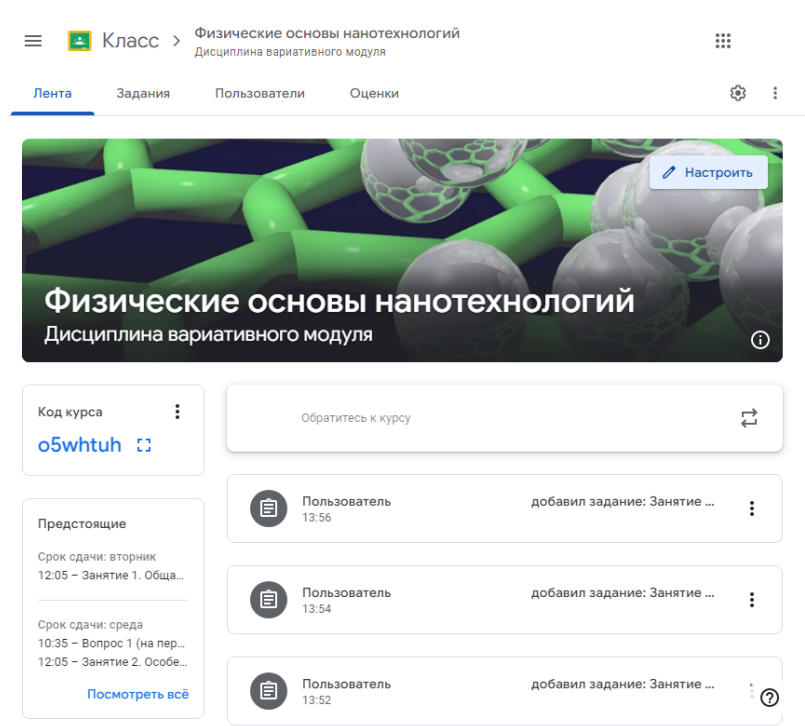


Рис. 2. Лента курса по физическим основам нанотехнологий.

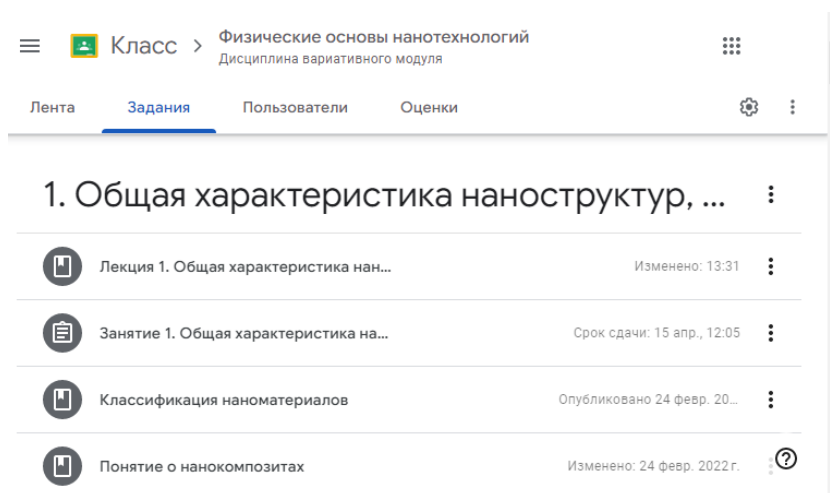


Рис. 3. Элементы первой темы по общей характеристике наноструктур, наноматериалов и нанотехнологий.

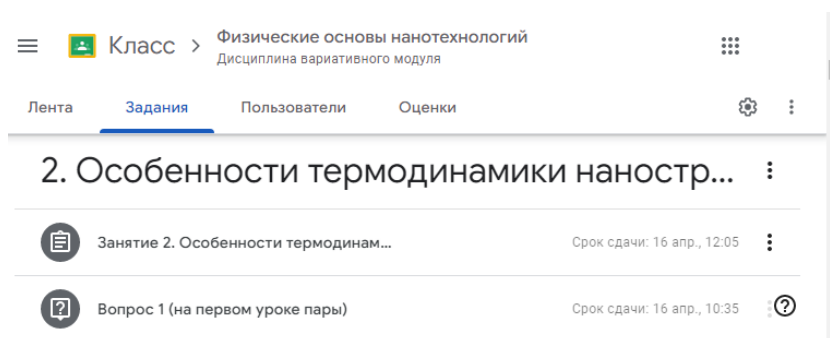


Рис. 4. Элементы второй темы по особенностям термодинамики наноструктур в составе курса физических основ нанотехнологий.

нанотехнологий.

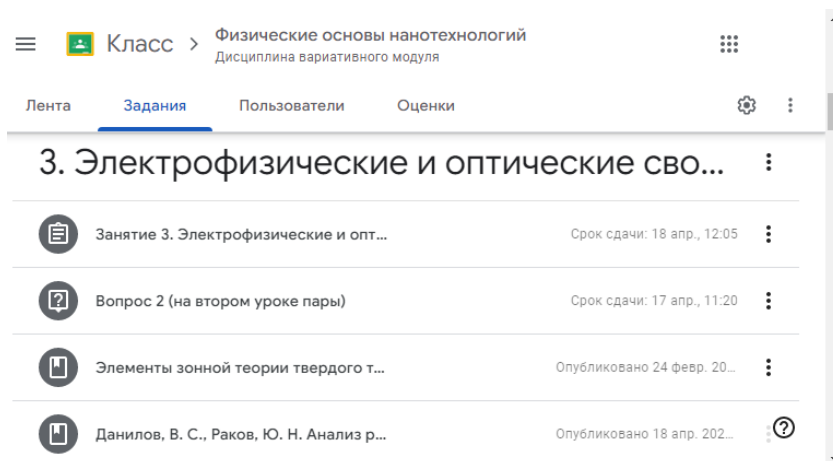


Рис. 5. Элементы третьей темы по электрофизическим и оптическим свойствам наноструктур в составе курса физических основ нанотехнологий.

На рис. 5 приведено изображение гипертекстовой страницы элементов третьей темы по электрофизическим и оптическим свойствам наноструктур в составе курса физических основ нанотехнологий.

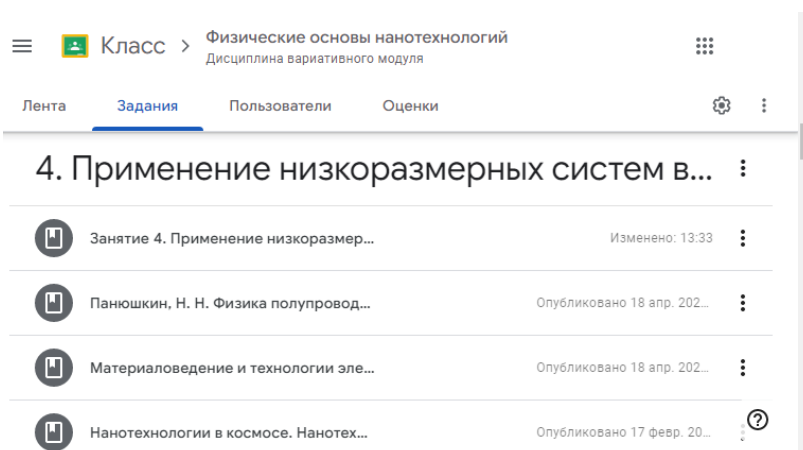


Рис. 6. Элементы четвёртой темы по применению низкоразмерных систем в электронике в составе курса физических основ нанотехнологий.

На рис. 6 приведено изображение гипертекстовой страницы элементов четвёртой темы по применению низкоразмерных систем в электронике в составе курса по физическим основам нанотехнологий.

На рис. 7 приведено изображение гипертекстовой страницы элементов пятой темы по технологиям получения наноматериалов и наноструктур в составе курса по физике физических основ нанотехнологий.

На рис. 8 приведено изображение гипертекстовой страницы элементов шестой темы по методам синтеза наночастиц и компактирования наноматериалов в составе курса по физике наносистем и наноустройств в современных технологиях.

Далее приведём примеры заданий в составе курса физических основ нанотехнологий.

Задание 1. Изучите основные свойства и методы исследования наносистем, а также принципы работы нанoeлектронных устройств. Создайте модель нанoeлектронного

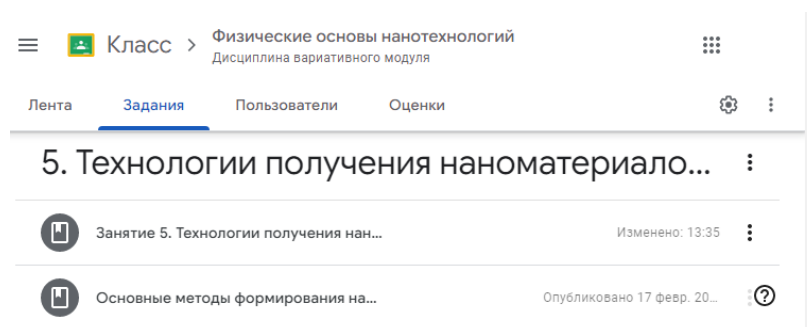


Рис. 7. Элементы пятой темы по технологиям получения наноматериалов и наноструктур в составе курса физических основ нанотехнологий.

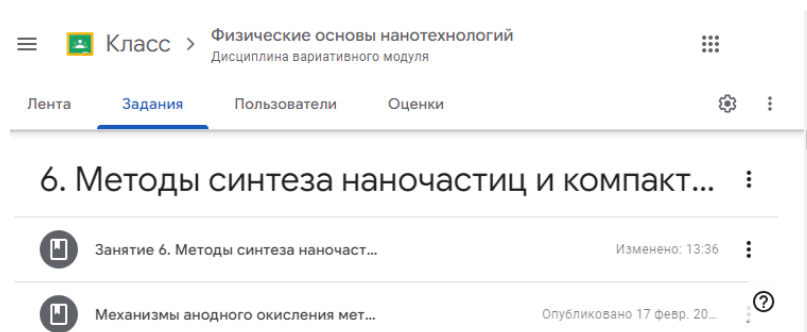


Рис. 8. Элементы шестой темы по методам синтеза наночастиц и компактирования наноматериалов в составе курса физических основ нанотехнологий.

устройства (например, нанотранзистора или наносенсора) и исследуйте его характеристики с помощью компьютерного моделирования. Обобщите полученные результаты и представьте их в виде доклада или презентации.

Задача 2. Изучите применение нанотехнологий в электронике. Разработайте научный проект использования наноструктурных материалов в электронных устройствах. Обоснуйте целесообразность и эффективность использования нанотехнологий в данной области, учитывая возможные риски.

Задание в форме wiki-элемента состоит в том, чтобы оформить статью для вики-энциклопедии по методам синтеза наночастиц, отразив в ней основные направления применения нанотехнологий для синтеза наночастиц, а также перспективы их использования.

Далее приведём вопросы семинарских занятий курса физических основ нанотехнологий.

Семинар 1. Каковы основные свойства наносистем и как они отличаются от свойств обычных систем, Какие методы используются для исследования наносистем? Как свойства материалов изменяются при переходе от макроскопического уровня к наноразмерному?

Семинар 2. Что такое наноэлектронные устройства и как они работают? Какие основные типы наноэлектронных устройств существуют? Какие технологии используются для создания наноэлектронных устройств?

Семинар 3. Что такое углеродные нанотрубки? Как углеродные нанотрубки используются в нанотехнологиях?

Семинар 4. Что такое сканирующая зондовая микроскопия и как она используется для исследования наносистем? Какие новые возможности открывает использование нанотехнологий в электронике? Как нанотехнологии могут помочь в решении энергетических проблем? Каковы перспективы развития нанотехнологий? Какие возможности

нанотехнологии могут открыть в будущем?

Онлайн-курс физических основ нанотехнологий является актуальным и востребованным в современном образовательном пространстве, поскольку нанотехнологии играют ключевую роль в развитии многих отраслей науки и техники. Структура и содержание курса обеспечивают комплексное и систематическое изложение основных принципов и методов физики наносистем и нанотехнологий, включая изучение их свойств, методов исследования, а также возможностей их применения в различных областях. Использование современных образовательных технологий, таких как интерактивные задания, видеоматериалы, презентации и онлайн-тестирование, позволяет сделать процесс обучения более эффективным и привлекательным для студентов. Включение в курс информации о последних достижениях и тенденциях в области нанофизики и нанотехнологий стимулирует интерес студентов к данной тематике и способствует их профессиональному росту. Курс способствует формированию у студентов критического мышления и навыков самостоятельной работы с научной литературой, что является важным компонентом современного образования. Разработка и внедрение онлайн-курсов по физике наносистем и наноустройств способствует интернационализации образования, так как такие курсы могут быть доступны студентам со всего мира. Данный курс может служить основой для дальнейшего углубленного изучения нанотехнологий и подготовки специалистов в этой области. Использование онлайн-курсов позволяет сделать образовательный процесс более гибким и адаптивным к индивидуальным потребностям студентов, учитывая их занятость и возможности для обучения. Онлайн-курс физических основ нанотехнологий может быть полезным не только студентам, но и специалистам в различных отраслях, которые хотят получить новые знания и навыки в области нанотехнологий. Создание и развитие онлайн-курсов стимулирует научные исследования в области нанотехнологий, так как преподаватели могут использовать эти курсы для популяризации результатов и привлечения внимания к исследованиям.

Онлайн-курс по учебной дисциплине, связанной с изучением физических основ нанотехнологий, является важным инструментом для изучения современных нанотехнологий и их применения в различных отраслях науки и промышленности. Онлайн-курс физических основ нанотехнологий позволяет студентам получить знания о наноматериалах, их физических свойствах и возможностях использования в нанoeлектронике.

Использование современных образовательных технологий и методов обучения физическим основам нанотехнологий, таких как интерактивные задания, видеоматериалы и онлайн-тестирование, для повышения эффективности обучения и мотивации студентов к изучению физических основ нанотехнологий. Включение в курс актуальной информации о последних достижениях и тенденциях в области нанотехнологий, что позволяет студентам быть в курсе последних научных открытий и стимулирует их профессиональное развитие.

Разработанные элементы в виде лекций и материалов содержат необходимые теоретические сведения для изучения курса по учебной дисциплине «Физические основы нанотехнологий». Разработанная система заданий и вопросов, семинаров позволяет контролировать знания в онлайн-курсе по учебной дисциплине «Физические основы нанотехнологий». Разработанный курс по учебной дисциплине «Физические основы нанотехнологий» может быть использован на педагогическом управлении подготовки с профилями по физике и математике, физике и информатике.

Курс физических основ нанотехнологий обладает рядом преимуществ перед другими формами обучения, такими как гибкость графика, доступность и возможность обучения в удобное время. Технология дистанционного обучения становится всё более популярной и востребованной образовательной технологией в условиях непрерывного развития современных образовательных технологий с учётом возможностей Интерне-

та и видеоконференцсвязи. Технологии дистанционного обучения позволяют успешно использовать их для достижения высоких результатов в изучении физических основ нанотехнологий.

Заключение

Онлайн-курс по учебной дисциплине, связанной с изучением физических основ нанотехнологий, является важным инструментом для изучения современных нанотехнологий и их применения в различных отраслях науки и промышленности. Онлайн-курс физических основ нанотехнологий позволяет студентам получить знания о наноматериалах, их физических свойствах и возможностях использования в нанoeлектронике. Разработанные элементы в виде лекций и материалов содержат необходимые теоретические сведения для изучения курса по учебной дисциплине «Физические основы нанотехнологий». Разработанная система заданий и вопросов, семинаров позволяет контролировать знания в онлайн-курсе по учебной дисциплине «Физические основы нанотехнологий». Курс физических основ нанотехнологий обладает рядом преимуществ перед другими формами обучения, такими как гибкость графика, доступность и возможность обучения в удобное время. Разработанный курс по учебной дисциплине «Физические основы нанотехнологий» может быть использован на педагогическом управлении подготовки с профилями по физике и математике, физике и информатике.

Выводы по работе можно сформулировать следующим образом:

1. написанный обзор научных работ по теме, связанной с исследованиями в области нанотехнологий, позволил наполнить структуру курса по учебной дисциплине «Физические основы нанотехнологий»,
2. разработанные элементы в виде лекций и материалов содержат необходимые теоретические сведения для изучения курса по учебной дисциплине «Физические основы нанотехнологий»,
3. разработанная система заданий и вопросов, семинаров позволяет контролировать знания в онлайн-курсе по учебной дисциплине «Физические основы нанотехнологий»,
4. разработанный дистанционный курс по учебной дисциплине «Физические основы нанотехнологий» может быть использован на педагогическом направлении подготовки с профилями по физике и математике, или физике и информатике.

Задачи работы решены полностью.

Гипотеза исследования, заключающаяся в том, что если применять элементы курса по физическим основам нанотехнологий, то можно построить систему подготовки, которая будет эффективной, а курс по физическим основам нанотехнологий имеет ряд преимуществ перед другими формами обучения, подтверждена полностью.

Использование современных образовательных технологий и методов обучения физическим основам нанотехнологий, таких как интерактивные задания, видеоматериалы и онлайн-тестирование, для повышения эффективности обучения и мотивации студентов к изучению физических основ нанотехнологий. Включение в курс актуальной информации о последних достижениях и тенденциях в области физических основ нанотехнологий, что позволяет студентам быть в курсе последних научных открытий и стимулирует их профессиональное развитие. Разработка онлайн-курса, который может быть использован для интернационализации образования и привлечения студентов со всего мира к изучению нанотехнологий.

Список использованных источников

1. Алтунин К. К., Колесова Т. А. Разработка элементов дистанционного курса по физической нанoeлектронике в системе управления обучением MOODLE // Наука online. — 2022. — № 1 (18). — С. 88–112. — URL: <https://elibrary.ru/dutung>.
2. Алтунин К. К., Шленкина Е. А. Разработка информационной системы поддержки изучения темы по оптике метаматериалов в составе курса по нанооптике // Наука online. — 2022. — № 2 (19). — С. 75–88. — URL: <https://elibrary.ru/pticsm>.
3. Алтунин К. К., Лебедев А. А. Разработка дистанционного курса по нанoфизике в системе управления обучением MOODLE // Наука online. — 2022. — № 2 (19). — С. 60–74. — URL: <https://elibrary.ru/mpcxsb>.
4. Алтунин К. К., Сорокина Е. О. Разработка материалов занятия по оптике нанoком-
позитных материалов в курсе по оптике тонкослойных и нанoструктурных покры-
тий // Наука online. — 2022. — № 2 (19). — С. 18–30. — URL: <https://elibrary.ru/wgfhkb>.
5. Алтунин К. К. Разработка компьютерного сопровождения изучения темы по спай-
зерам в курсе нанооптики // Наука online. — 2018. — № 4 (5). — С. 74–93. — URL:
<https://elibrary.ru/pvxfxn>.
6. Алтунин К. К., Петрова Е. А. Разработка модульной структуры дистанционного кур-
са «Оптика метаматериалов» в системе управления обучением MOODLE // Наука
online. — 2019. — № 1 (6). — С. 50–70. — URL: <https://elibrary.ru/pgpsft>.
7. Алтунин К. К., Карташова А. А. Разработка электронного образовательного ресурса
по солнечной энергетике // Наука online. — 2019. — № 2 (7). — С. 15–32. — URL:
<https://elibrary.ru/omnoyk>.
8. Сорокина Е. С. Результаты создания сайта по электрическим явлениям в курсе фи-
зики основной школы // Наука online. — 2022. — № 3 (20). — С. 109–124. — URL:
<http://nauka-online.ru/wp-content/uploads/2023/01/03202022-007.pdf>.
9. Карасева П. П. Разработка онлайн-курса по физике наносистем и наноустройств в
современных технологиях // Наука online. — 2024. — № 3 (28). — С. 39–51. — URL:
<http://nauka-online.ru/wp-content/uploads/2024/09/03282024-003.pdf>.

Сведения об авторах:

Полина Петровна Карасева — студент факультета физико-математического и
технологического образования ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогиче-
ский университет имени И. Н. Ульянова», Ульяновск, Россия.

E-mail: karassiic1407@mail.ru

ORCID iD  0009-0007-7205-0575

Web of Science ResearcherID  LDB-2733-2024

Original article
 PACS 01.40.Di
 OCIS 000.2060
 MSC 00A79

Development of an online course on the physical foundations of nanotechnology

P. P. Karaseva 

Ulyanovsk State Pedagogical University, 432071, Ulyanovsk, Russia

Submitted June 20, 2025

Resubmitted June 27, 2025

Published September 30, 2025

Abstract. The results of developing an online course on the physical principles of nanotechnology are described. The aim of the study is to provide a scientific and methodological justification for the development of an online course on the physical principles of nanotechnology. The results of developing a modular structure for the online course on the physical principles of nanotechnology, taking into account the specifics of distance learning at universities, are presented. The results of developing selected content elements for the online course on the physical principles of nanotechnology are presented.

Keywords: nanotechnology, online course, distance learning, principles of nanosystem physics

References

1. Altunin K. K., Kolesova T. A. Development of Distance Learning Course Elements on Physical Nanoelectronics in the MOODLE Learning Management System // Science online. — 2022. — no. 1 (18). — P. 88–112. — URL: <https://elibrary.ru/dutumg>.
2. Altunin K. K., Shlenkina E. A. Development of an information system to support the study of the topic of metamaterial optics as part of a course on nanooptics // Science online. — 2022. — no. 2 (19). — P. 75–88. — URL: <https://elibrary.ru/pticsm>.
3. Altunin K. K., Lebedev A. A. Development of a distance learning course on nanophysics in the MOODLE learning management system // Science online. — 2022. — no. 2 (19). — P. 60–74. — URL: <https://elibrary.ru/mpcxsb>.
4. Altunin K. K., Sorokina E. O. Development of lesson materials on the optics of nanocomposite materials in a course on the optics of thin-film and nanostructured coatings // Science online. — 2022. — no. 2 (19). — P. 18–30. — URL: <https://elibrary.ru/wgfhkb>.
5. Altunin K. K. Development of computer support for studying the topic of spacers in a nanooptics course // Science online. — 2018. — no. 4 (5). — P. 74–93. — URL: <https://elibrary.ru/pvxfxn>.
6. Altunin K. K., Petrova E. A. Development of a modular structure for the distance learning course “Optics of Metamaterials” in the learning management system MOODLE // Science online. — 2019. — no. 1 (6). — P. 50–70. — URL: <https://elibrary.ru/pgpsft>.

7. Altunin K. K., Kartashova A. A. Development of an electronic educational resource on solar energy // Nauka online. — 2019. — no. 2 (7). — P. 15–32. — URL: <https://elibrary.ru/omnoyk>.
8. Sorokina E. S. Results of creating a website on electrical phenomena in a basic school physics course // Science online. — 2022. — no. 3 (20). — P. 109–124. — URL: <http://nauka-online.ru/wp-content/uploads/2023/01/03202022-007.pdf>.
9. Karaseva P. P. Development of an online course on the physics of nanosystems and nanodevices in modern technologies // Science online. — 2024. — no. 3 (28). — P. 39–51. — URL: <http://nauka-online.ru/wp-content/uploads/2024/09/03282024-003.pdf>.

Information about authors:

Polina Petrovna Karaseva — 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: karassiic1407@mail.ru

ORCID iD  0009-0007-7205-0575

Web of Science ResearcherID  LDB-2733-2024

Научная статья
УДК 004.77
ББК 22.18
ГРНТИ 20.53.23
ВАК 1.2.3.
PACS 01.40.Di
OCIS 000.2060
MSC 00A79

Разработка дистанционного курса по оптическим нанотехнологиям

А. Д. Селюкова  ¹

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

Поступила в редакцию 17 июня 2025 года
После переработки 25 июня 2025 года
Опубликована 30 сентября 2025 года

Аннотация. Представлены результаты разработки дистанционного курса по оптическим нанотехнологиям в системе управления обучением MOODLE. Целью исследования является описание процесса разработки дистанционного курса по оптическим нанотехнологиям в системе управления обучением MOODLE. Описаны результаты разработки структуры и элементов дистанционного курса по оптическим нанотехнологиям в системе управления обучением MOODLE. Объём дистанционного курса по оптическим нанотехнологиям составляет 6 зачетных единиц или 216 часов.

Ключевые слова: нанотехнологии, наноэлектроника, фотоника, дистанционный курс, дистанционное обучение, система управления обучением, подготовка кадров

Введение

Оптические нанотехнологии являются одним из ключевых направлений современной науки и техники, находящим применение в фотонике, телекоммуникациях и наноэлектронике. Развитие нанотехнологий является одним из приоритетных направлений научно-технического прогресса, что обуславливает необходимость подготовки квалифицированных специалистов в области нанотехнологий. Развитие дистанционного образования открывает новые возможности для профессиональной подготовки специалистов в области нанотехнологий. Однако существующие курсы зачастую не учитывают специфику оптических нанотехнологий, что снижает их эффективность. В связи с этим создание специализированного дистанционного курса позволит повысить доступность обучения и качество подготовки кадров в сфере нанотехнологий. Онлайн-курсы предоставляют возможность получить качественное образование в области нанотехнологий без необходимости постоянного посещения учебного заведения, что особенно актуально для студентов, проживающих в отдалённых регионах.

¹E-mail: selyukova2003810@gmail.com

Целью исследования является описание процесса разработки дистанционного курса по оптическим нанотехнологиям в системе управления обучением MOODLE.

Для достижения указанной цели в работе поставлены следующие задачи:

1. анализ литературы по современным образовательным технологиям, применяемым в дистанционном обучении,
2. определение ключевых тем и модулей дистанционного курса по оптическим нанотехнологиям, соответствующих актуальным тенденциям в развитии нанотехнологий,
3. разработка методического обеспечения курса, включая теоретические материалы, материалы для контроля знаний и систему оценивания.

Объектом исследования является дистанционное обучение в сфере нанотехнологий. Предметом исследования является процесс разработки дистанционного курса по оптическим нанотехнологиям.

Методами научного исследования являются анализ научной литературы по теме исследования, проектирование структуры курса по оптическим нанотехнологиям с учётом принципов педагогического дизайна. Материалами исследования являются научные публикации по оптическим нанотехнологиям, платформа дистанционного обучения MOODLE.

Научная новизна исследования заключается в том, что разработан авторский курс по оптическим нанотехнологиям в дистанционном формате.

Гипотеза исследования заключается в том, что если использовать специализированный дистанционный курс по оптическим нанотехнологиям, интегрирующий теоретические материалы и практические задания, то можно повысить эффективность изучения оптических нанотехнологий.

Теоретическая значимость заключается в том, что исследование дополняет педагогическую науку новыми подходами к разработке дистанционных курсов в области высокотехнологичных дисциплин по нанотехнологиям. Практическая значимость заключается в том, что разработанный курс может быть внедрён в программы высшего образования, что позволит расширить доступ к обучению и повысить квалификацию специалистов.

Обзор работ по оптическим нанотехнологиям

Оптическая нанотехнология является быстро развивающейся областью, которая использует уникальные свойства наноструктур для улучшения и инноваций в оптических приложениях. В основе этой технологии лежит способность манипулировать светом в наномасштабе, что достигается за счёт интеграции нанофотонных структур, таких как наномасштабные волноводы и металл-диэлектрические наноструктуры. Эта интеграция обеспечивает разрешение ниже предела дифракции в оптической наноскопии, значительно расширяя возможности визуализации по сравнению с обычной оптической микроскопией [1]. Оптическая наноскопия использует принципы нанофотоники для улучшения пространственно-временного разрешения путём манипулирования светом в наномасштабе, как обсуждается в работе [1], и достигает разрешения ниже предела дифракции. Оптическая нанотехнология относится к применению нанофотоники для улучшения оптических методов визуализации, в частности, посредством оптической наноскопии. Эта область использует наномасштабные структуры, такие как волноводы и металл-диэлектрические наноструктуры, для манипулирования светом в наномасштабе, достигая разрешения ниже предела дифракции. Интегрируя эти нанофотонные элементы с методами визуализации на основе флуоресценции, оптическая нанотехнология значительно улучшает способность исследовать и понимать наноскопический мир,

предоставляя знания, превосходящие возможности обычной оптической микроскопии [1]. Миниатюризация вещества в нанотехнологиях влияет на взаимодействие и распространение света, особенно в металлах и полупроводниках. В нанометаллических средах свет может быть ограничен и сфокусирован за пределами дифракционного предела, создавая интенсивные «горячие точки», которые сильно взаимодействуют с окружающей средой [2]. В работе [2] представлено, как нанотехнологии влияют на оптику, а именно, как миниатюризация материи влияет на взаимодействие и распространение света в материи, особенно и наиболее интересно в металле и полупроводниках. Оптическая нанотехнология включает в себя манипуляцию светом в наномасштабе, используя такие материалы, как нанометаллы и полупроводники, для достижения беспрецедентных оптических свойств. В нанометаллических средах свет может направляться и ограничиваться за пределами обычных пределов, создавая интенсивные «горячие точки». Полупроводниковые нанокристаллы демонстрируют зависящую от размера люминесценцию, что позволяет получать яркие цветные излучения. Эта область позволяет применять её в электронике, биомедицине и сборе энергии, демонстрируя потенциал наномасштабных взаимодействий для революции в оптических технологиях и улучшения взаимодействия света и материи [2]. Кроме того, разработка оптических метаматериалов с помощью методов нанотехнологий, таких как лазерные методы, предлагает масштабируемые и экономически эффективные решения для промышленного оптического производства [3]. Методы нанотехнологий, в частности лазерные методы, исследуются для производства двумерных и трёхмерных метаматериалов, предлагая высокую производительность и низкую стоимость, что делает их перспективными для промышленного оптического производства. В статье [3] обсуждается использование нанотехнологий в производстве оптических метаматериалов, уделяя особое внимание методам создания субмикронных и нанометровых структур, в частности с помощью лазерных методов. Эти методы выделяются своей масштабируемостью и потенциалом для высокой производительности при более низких затратах по сравнению с традиционными методами, такими как электронная литография и обработка сфокусированным ионным пучком. В статье [3] подчёркивает перспективность этих технологических подходов для промышленного оптического производства, что делает их значимыми в области оптической нанотехнологии. Эти достижения дополняются ролью наноструктурированных элементов в создании новых функций для оптической связи, обработки сигналов, визуализации и зондирования [4]. В статье [4] рассматривается роль нанотехнологий с особым акцентом на метаматериалах и нанофотонике неоднородных материалов, состоящих из диэлектрических, полупроводниковых и металлических композиций, для создания новых функций для различных приложений, включая оптическую связь, обработку оптических сигналов, визуализацию и зондирование. Оптическая нанотехнология включает в себя манипуляцию светом в наномасштабе, используя такие материалы, как диэлектрики, полупроводники и металлы, для создания новых функций. Эта область охватывает нанофотонику и метаматериалы, которые обеспечивают прогресс в оптической связи, обработке сигналов, визуализации и зондировании. Используя уникальные свойства наноструктурированных элементов, В статье [4] разрабатываются инновационные оптические устройства, которые повышают производительность и эффективность в различных приложениях, в конечном итоге приводя к значительным улучшениям в технологии и функциональности. Кроме того, электрооптическая нанотехнология, которая включает в себя управление размерами кристаллов и химией поверхности, имеет решающее значение для приложений от детекторов до дисплеев, включая органические светодиоды [5]. В работе [5] показано, что влияние размера металла и квантовой наноструктуры (увеличение размеров увеличит движение носителей заряда) являются основными компонентами теории электронной нанотехнологии. Оптическая нанотехнология, также извест-

ная как нанооптика или нанофотоника, играет дополнительную роль по отношению к микроэлектронике и наноэлектронике в разработке чипов. В работе [5] рассматривается взаимодействие света с наноструктурами, которое имеет решающее значение для таких приложений, как дисплеи и детекторы. Поглощение и испускание света в наноматериалах имеют важное значение для производства органических светодиодов. Ключевые компоненты включают управление размерами кристаллов и химию поверхности для повышения линейности оптических свойств, особенно в полимерно-дисперсных жидких кристаллах [5]. В совокупности эти инновации в оптической нанотехнологии обещают разнообразные приложения в секторах электроники, биомедицины и энергетики, демонстрируя преобразующий потенциал манипулирования светом в наномасштабе.

Оптоволоконная нанотехнология включает применение наноструктурированных материалов и устройств для улучшения оптических систем связи. В контексте передачи электроэнергии она использует сильную оптическую нелинейность третьего порядка и оптическую солитонную связь для повышения эффективности передачи данных. В статье [6] показано, что эта технология поддерживает потери в кабеле связи в стандартных пределах, достигая при этом скорости цифровой связи, превышающей 7000 бит/с, что демонстрирует её надёжность и эффективность в сетях электросвязи. В статье [6] показано, что при применении оптоволоконной нанотехнологии для передачи электроэнергии потери в кабеле связи находятся в стандартном диапазоне, а скорость цифрового интерфейса связи превышает 7000 бит/с в различных объёмах обслуживания, что эффективно подтверждает надёжность оптоволоконной нанотехнологии для передачи электроэнергии.

Оптическая нанотехнология подразумевает использование наноматериалов для эффективного управления светом в различных приложениях, включая борьбу с подделками. Последние достижения в области оптических наноматериалов, такие как наночастицы с апконверсией, обеспечивают уникальные оптические свойства, которые могут быть адаптированы для высокозащищённого кодирования информации. Эти материалы могут реагировать на внешние воздействия, позволяя производить скрытые сигналы излучения. Интеграция технологий декодирования на основе смартфонов с этими наноматериалами представляет многообещающие возможности для аутентификации в реальном времени и отслеживания подлинных продуктов, усиливая меры безопасности в различных отраслях. В статье [7] показано, что достижения в разработке и синтезе наночастиц с апконверсией, легированных лантанидами, приведут к следующему поколению технологий борьбы с подделками.

Оптическая нанотехнология включает разработку усовершенствованных оптических наносенсоров и сенсорных устройств, которые обнаруживают изменения оптических свойств из-за взаимодействия молекул и аналитов [8]. Эти датчики используют такие принципы, как поглощение, отражение, люминесценция и флуоресценция в различных спектральных областях. Они характеризуются высокой чувствительностью, быстрым временем отклика и низкими пределами обнаружения, что делает их пригодными для применения в персонализированном мониторинге здоровья, мониторинге окружающей среды и анализе качества продуктов питания. Основные типы включают люминесцентные датчики, датчики поверхностного плазмонного резонанса и квантовые точки. Усовершенствованные оптические наносенсоры преобразуют молекулярные взаимодействия в аналитически полезную информацию на основе интенсивности света. Они измеряют изменения оптических свойств в корреляции с концентрацией аналита и охватывают различные области спектра [8].

Оптическая нанотехнология, также известная как нанооптика или нанофотоника, фокусируется на изучении и применении уникальных оптических свойств наноструктур. Оптическая нанотехнология подразумевает использование наноматериалов и струк-

тур для управления светом и улучшения оптических систем. Оптическая нанотехнология занимается изучением и манипулированием светом в нанометровом масштабе, уделяя особое внимание тому, как объекты нанометрового масштаба взаимодействуют со светом. Эта быстро развивающаяся область удовлетворяет спрос на меньшие, более быстрые и более интегрированные оптические устройства, а также чувствительные детекторы для биомедицинских и экологических приложений. Нанопотоника объединяет множество важных направлений инновационных разработок, включая лазеры, фотovoltaику, биотехнологию, фотонику и нанотехнологию. В последнее время растущий опыт слияния нанотехнологий и фотоники стал фундаментальным, возникая на периферии, бросая вызов базовым экспериментам.

В статье [9] обсуждаются различные механизмы улучшения взаимодействия света и вещества для реализации яркой флуоресценции, комбинационного рассеяния и нелинейного оптического излучения, а также изучаются методологии и различные устройства для высокочувствительного оптического зондирования и обнаружения, сверхвысокого пространственного разрешения изображений и высокоэффективного преобразования энергии между светом и электричеством, теплом и другими формами. Оптическая нанотехнология, или нанопотоника, объединяет нанонауку с оптикой для управления светом в наномасштабе. Нанопотоника фокусируется на улучшении взаимодействия света и вещества с помощью оптических наноструктур, что позволяет использовать такие приложения, как высокочувствительное оптическое зондирование, сверхвысокое пространственное разрешение изображений и эффективное преобразование энергии. Ключевые механизмы включают медленный свет и оптические резонансы, которые улучшают такие явления, как флуоресценция и комбинационное рассеяние. Эта область направлена на достижение крупномасштабной оптической интеграции для передовых технологий обработки информации и энергетики, используя свет в качестве мощного носителя.

Нанопотоника является захватывающей областью нанонауки, которая занимается взаимодействием света с веществом в масштабе микрометров и нанометров, область, в которой фотоника сливается с нанонаукой и нанотехнологией, создавая проблемы для фундаментальных исследований и возможности для новых технологий и приложений. Оптическая нанотехнология, особенно в волоконной оптике, включает в себя интеграцию нанопункций в оптические волокна для управления светом за пределами обычного транспорта. Оптическая нанотехнология включает в себя использование фотонных кристаллических волокон и волокон с поллой сердцевиной, которые обладают уникальными свойствами, такими как сверхнизкая оптическая нелинейность и улучшенная управляемая мощность [10]. Эти достижения открывают новые возможности для применения в телекоммуникациях, зондировании и подаче высокой оптической мощности, а также позволяют разрабатывать миниатюрные оптические компоненты, такие как резонаторы и интерферометры, стимулируя инновации в различных областях.

В статье [11] рассматриваются наносистемы, которые потенциально могут быть использованы для офтальмологических приложений, и приводятся некоторые примеры применения нанотехнологий в областях офтальмологических устройств, диагностики и систем доставки генов или лекарств. Оптическая нанотехнология подразумевает использование наноматериалов для улучшения методов визуализации, особенно в офтальмологии. Золотые наночастицы, наноболочки и наноклетки служат перспективными контрастными агентами для оптической когерентной томографии, улучшая качество изображения за счёт усиления отражения света. Их оптические резонансные длины волн можно точно настраивать, что позволяет лучше визуализировать биологические ткани. Это достижение в области оптической нанотехнологии вносит значительный вклад в диагностику и мониторинг глазных заболеваний, предоставляя изображения

поперечного сечения в реальном времени с улучшенной чувствительностью и разрешением.

В работе [12] обсуждается влияние оптики и лазеров на нанотехнологии и то, как миниатюризация материи взаимодействует со светом, а результаты такого рода исследований открывают новые направления исследований и прорывов в приложениях, включая методы наномасштабного производства с использованием лазеров, нанометровых фотонных устройств и высокоэффективного преобразования энергии. Оптическая нанотехнология, часто называемая нанофотоникой или нанооптикой, фокусируется на взаимодействии света с наноразмерными материалами. Эта область изучает, как миниатюризированная материя влияет на поведение света, что приводит к достижениям в таких приложениях, как микроэлектроника, оптоэлектроника, солнечные элементы, датчики и микроскопия [12]. Интеграция лазеров в нанотехнологии облегчает методы наномасштабного производства и разработку фотонных устройств, повышая эффективность преобразования энергии и открывая новые возможности для исследований и технологических прорывов.

В работе [13] обсуждается применение нанотехнологий в оптических сетях, в частности в оптоволоконной связи, инфракрасных детекторах и фотоэлектричестве. В работе [13] подчёркивается использование квантовых точек PbS и кремниевых нанокристаллов, которые могут повысить оптическое усиление и обеспечить лазерную генерацию при комнатной температуре на кремниевых подложках. Интеграция этих наноматериалов в устройства направлена на повышение эффективности сбора света и передачи энергии, решая проблемы переноса заряда через интерфейсы кремний-полимер-квантовая точка для оптоэлектронных приложений. Использование квантовых точек PbS и кремниевых нанокристаллов является возможным материалом, который может быть использован в этих областях, как упоминалось в работе [13], и они использовались в оптоволоконной связи, инфракрасных детекторах и фотоэлектричестве.

Оптическая нанотехнология подразумевает использование наноматериалов для разработки усовершенствованных датчиков, способных обнаруживать загрязнители окружающей среды с высокой чувствительностью и специфичностью [14]. Эти технологии позволяют осуществлять мониторинг загрязнителей в реальном времени в естественных условиях, устраняя необходимость в трудоёмкой подготовке образцов. Недавние достижения в области нанопроизводства и технологий зеленого синтеза привели к созданию компактных, экономически эффективных и экологически чистых оптических биосенсоров. Эти датчики могут обнаруживать ряд токсинов, включая тяжёлые металлы и пестициды, значительно улучшая мониторинг окружающей среды и усилия по управлению загрязнением. Датчики на основе оптических нанотехнологий обеспечивают высокочувствительный и мониторинг загрязнителей окружающей среды в реальном времени в их естественной среде, снижая необходимость в трудоёмкой подготовке образцов [14].

В работе [15] нанофотоника определяется как наномасштабная оптическая наука и технология, которая является новым рубежом, который включает наномасштабное ограничение излучения, наномасштабное ограничение вещества и наномасштабное фотофизическое или фотохимическое преобразование. Оптическая нанотехнология, как исследовано в работе [15] о нанофотонике, включает наномасштабное ограничение излучения и вещества для манипулирования светом в наномасштабе. Эта область включает нелинейные оптические взаимодействия, изучаемые с помощью геометрий ближнего поля, что позволяет контролировать динамику возбуждения и перенос энергии. Кроме того, оптическая нанотехнология охватывает пространственно локализованную фотохимию для приложений в нанопроизводстве и наномасштабной памяти, используя наноструктурированные материалы, такие как легированные редкоземельными элемен-

тами стекла и новые неорганические-органические фоторефрактивные нанокompозиты для достижения локализации фотонов.

Оптическая нанотехнология включает в себя манипуляцию оптическим излучением в наномасштабе, используя такие явления, как локализованный поверхностный плазмонный резонанс для улучшения оптических свойств наночастиц [16]. Эта область имеет важные приложения в здравоохранении, особенно в датчиках и визуализации, а также в терапии рака за счёт эффективного преобразования света в тепло. Различные наночастицы, включая металлические и квантовые точки, играют решающую роль в этих приложениях, обеспечивая автоматизированные и целевые технологии для диагностики и лечения, тем самым устраняя ограничения традиционных методов. Локализованный поверхностный плазмонный резонанс становится многообещающим инструментом для адаптации оптических свойств наночастиц благородных металлов для их применения в датчиках, визуализации, как упоминалось в работе [16].

Синтез и применение оптических наноматериалов стимулируют технологические инновации, продвигая научные дисциплины и отрасли промышленности за счёт новых свойств и функций, с потенциалом в таких областях, как энергетика, медицина и электроника. Оптическая нанотехнология включает синтез и применение наноматериалов, которые манипулируют светом в наномасштабе. Эти материалы демонстрируют уникальные оптические свойства, обеспечивая достижения в различных областях, таких как телекоммуникации, зондирование и визуализация. В статье [17] подчёркивается инновационный потенциал оптических наноматериалов в повышении производительности устройств и создании новых функций, тем самым стимулируя технологический прогресс во многих научных дисциплинах и отраслях. Эта область имеет решающее значение для разработки оптических устройств и систем следующего поколения.

В работе [18] исследуются уникальные возможности и преимущества нанотехнологий в разработке интегрированных фотонных информационных систем следующего поколения, включая фильтры, электрически или оптически управляемые коммутационные ткани, оптические источники, детекторы, усилители. Оптическая нанотехнология включает в себя манипуляцию светом в наномасштабе, используя материалы и структуры, которые проявляют уникальные оптические свойства благодаря своему размеру и геометрии. Эта область позволяет разрабатывать передовые фотонные устройства, такие как субволновые решётки и поверхностные плазмон-поляритоны, которые улучшают такие функциональные возможности, как обработка сигналов и формирование пучка. Интеграция этих нанофотонных компонентов в информационные системы облегчает миниатюризацию и многофункциональность, значительно увеличивая сложность и эффективность оптических схем и систем.

В работе [19] исследуются уникальные возможности и основные преимущества нанотехнологий в разработке интегрированных фотонных чипов следующего поколения, включая фильтры, коммутационные ткани, которые могут управляться как электрически, так и оптически, оптические источники, детекторы, усилители. Оптическая нанотехнология включает разработку наноструктурированных материалов и устройств, которые манипулируют светом в наномасштабе. Эта область фокусируется на создании интегрированных фотонных чипов с такими компонентами, как фильтры, переключатели и детекторы, расширяя функциональные возможности за счёт миниатюризации и взаимодействия в ближнем поле. Ключевые приложения включают управление поляризацией, спектральную фильтрацию и нелинейные оптические эффекты, что позволяет интегрировать их с другими нанотехнологиями, такими как электроника и биология. Исследование уделяет особое внимание разработке искусственных двулучепреломляющих материалов и фотонных кристаллов для современных оптических систем.

В работе [20] исследуется роль нанотехнологий с особым акцентом на нанофотонике

в диэлектрических и неоднородных метаматериалах с приложениями для оптической обработки информации в пространстве и времени, связи и зондирования. Оптическая нанотехнология, в частности нанофотоника, включает в себя манипуляцию светом в наномасштабе с использованием таких материалов, как диэлектрические и неоднородные метаматериалы. Эта область играет решающую роль в продвижении таких приложений, как оптическая обработка информации, связь и зондирование. Используя уникальные свойства наноструктурированных материалов, исследователи могут повысить производительность и эффективность оптических устройств, что приводит к инновациям в различных секторах, включая информационные технологии, здравоохранение и национальную безопасность.

Нанофотоника охватывает широкий спектр нетривиальных физических эффектов, включая взаимодействия света и вещества, которые выходят далеко за пределы дифракции, и открыли новые возможности для различных приложений в технологиях сбора света, зондирования, люминесценции, оптического переключения и передачи данных, как упоминалось в работе [21]. Оптическая нанотехнология является ключевым аспектом нанофотоники, фокусируясь на взаимодействии света и вещества в наномасштабе. Она позволяет разрабатывать устройства, которые манипулируют фотонами инновационными способами, улучшая приложения в области сбора света, зондирования и оптического переключения. Понимая взаимодействия света и вещества за пределами дифракции, исследователи могут создавать наноструктуры, которые улучшают производительность в различных областях, включая материаловедение и биомедицинские технологии, что в конечном итоге приводит к прогрессу в оптических системах и технологиях в повседневной жизни.

В работе [22] рассматривается роль нанотехнологий с акцентом на нанофотонику в диэлектрических, металлических и полупроводниковых неоднородных композиционных материалах, устройствах и подсистемах для оптической связи, обработки информации и сигналов, а также зондирования. Оптическая нанотехнология, в частности в нанофотонике, фокусируется на использовании материалов с неоднородным составом, таких как диэлектрики, металлы и полупроводники, для разработки современных оптических устройств и подсистем. Эта технология позволяет создавать компактные оптические компоненты на кристалле, улучшая интеграцию с электронными системами. Инновации включают нанолазеры и нелинейные импульсные компрессоры, которые используют субволновые характеристики и метаматериалы для оптимизации производительности, уменьшения размера и повышения эффективности для приложений в оптической связи, обработке информации и зондировании.

В работе [23] представлено краткое введение в оптические нанозонды в терминах наноматериалов, единиц распознавания и оптического обнаружения. Оптическая нанотехнология включает разработку оптических нанозондов на основе наноматериалов, которые демонстрируют высокую чувствительность и специфичность для химического и биологического анализа. Эти нанозонды используют различные наноматериалы, такие как золотые и серебряные наночастицы, квантовые точки и графен, которые обладают уникальными оптическими свойствами. Интегрируя единицы распознавания, такие как аптамеры и химические лиганды, эти системы могут переводить целевые взаимодействия в измеримые оптические сигналы, используя такие методы, как колориметрия, спектры в ультрафиолетовой и видимой областях спектра, флуоресценция и поверхностно-усиленное комбинационное рассеяние.

В работе [24] рассматривается роль нанотехнологий с акцентом на нанофотонику в диэлектрических, металлических, полупроводниковых неоднородных композиционных материалах, а также устройствах и подсистемах для оптической связи, обработки информации и сигналов и зондирования. Оптическая нанотехнология, в частности в

нанофотонике, включает в себя манипуляцию светом в наномасштабе с использованием таких материалов, как диэлектрики, металлы и полупроводники. Эта технология позволяет разрабатывать компактные фотонные компоненты, такие как нанолазеры и интегрированные оптические подсистемы, которые улучшают оптическую связь и обработку сигналов. Оптимизируя конструкции резонаторов и включая такие материалы, как кремниевые экраны, в работе [24] можно снизить пороги усиления для эффективной работы при комнатной температуре, прокладывая путь для передовых приложений в информационных системах и оптической интеграции на кристалле.

Проведённый анализ литературы по фундаментальным и прикладным исследованиям оптических нанотехнологий показал актуальность темы исследования.

Результаты разработки курса по оптическим нанотехнологиям

Разработка дистанционного курса по оптическим нанотехнологиям в системе управления обучением MOODLE требует тщательного планирования и поэтапной реализации. Прежде всего, необходимо провести исследование целевой аудитории, выяснив уровень подготовки студентов, их потребности и ожидания, чтобы сформулировать четкие образовательные цели дистанционного курса, такие как освоение фундаментальных принципов оптических нанотехнологий или применение знаний на практике. На основе поставленных целей формируется детальная программа дистанционного курса, включающая модули по основам нанофотоники, методам синтеза наноматериалов, современным оптическим устройствам другим ключевым темам, при этом важно соблюдать логическую последовательность и постепенное усложнение материала. Для каждого модуля подготавливаются лекционные материалы, презентации, видеолекции, научные статьи и ссылки на дополнительные источники, чтобы обеспечить студентам разностороннее погружение в тему, а также методические рекомендации по самостоятельной работе. Чтобы вовлечь обучающихся, в курс включаются интерактивные задания: виртуальные лабораторные работы по моделированию оптических свойств наноструктур, тесты с автоматической проверкой, форумы для обсуждения и кейсы на основе реальных научных исследований. Далее курс интегрируется в MOODLE: создаются структурированные разделы, настраиваются элементы курса (лекции, тесты, задания), выбираются подходящие форматы представления контента (например, SCORM-пакеты или встроенные видео), а также устанавливаются сроки выполнения заданий. Для оценки успеваемости проектируются разноуровневые тесты, курсовые проекты и итоговый экзамен, при этом важно предусмотреть как автоматизированную проверку тестов, так и экспертный анализ развернутых ответов и исследований студентов. Перед запуском курс тестируется на фокус-группе, чтобы выявить технические недочеты, сложность восприятия материалов или логические пробелы, после чего вносятся корректировки в контент и настройки MOODLE. Педагоги и администраторы проходят обучение по работе с курсом в MOODLE, изучая функционал системы, особенности проверки заданий и взаимодействия со студентами, чтобы обеспечить бесперебойное сопровождение учебного процесса. После официального старта курса проводится постоянный мониторинг активности анализ результатов тестов и обратной связи, что позволяет оперативно адаптировать сложные темы или изменять нагрузку. По мере развития оптических нанотехнологий курс регулярно дополняется новыми исследованиями, инструментами виртуальных лабораторий и актуальными кейсами, чтобы оставаться востребованным и соответствовать современным научным трендам. Таким образом, разработка дистанционного курса в MOODLE является динамичным процессом, который требует междисциплинарного подхода, сочетания педагогических и технологических решений для создания качественного образовательного продукта.

Процесс создания структуры и элементов курса по оптическим нанотехнологиям на

результаты анализа элементов других дистанционных курсов по аналогичной тематике [25–33]. В результате выполнения самостоятельной части работы созданы элементы курса по оптическим нанотехнологиям. Приведём описание избранных элементов курса по оптическим нанотехнологиям.

Опишем результаты разработки структуры и элементов дистанционного курса по оптическим нанотехнологиям в системе управления обучением MOODLE. Объём дистанционного курса по оптическим нанотехнологиям составляет 6 зачетных единиц или 216 часов. Базой исследования для создания дистанционного курса по дисциплине «Оптические нанотехнологии» в системе управления обучением MOODLE является образовательный портал ФГБОУ ВО «УлГПУ им. И. Н. Ульянова».

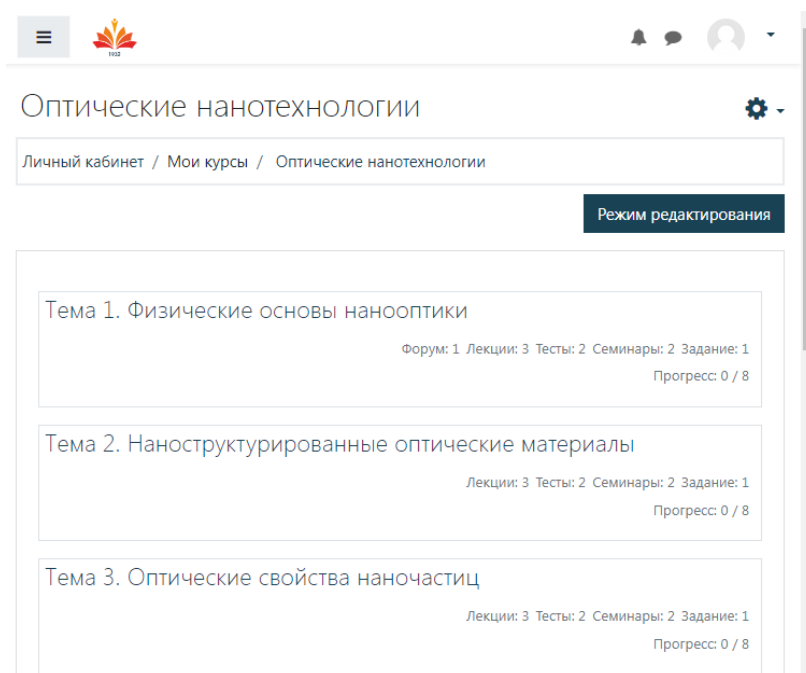


Рис. 1. Страница тематических модулей первой части дистанционного курса по оптическим нанотехнологиям, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 1 приведено изображение страницы тематических модулей первой части дистанционного курса по оптическим нанотехнологиям, созданного на портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 2 приведено изображение страницы тематических модулей второй части дистанционного курса по оптическим нанотехнологиям, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 3 приведено изображение страницы элементов первой темы дистанционного курса по оптическим нанотехнологиям, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 4 приведено изображение страницы элементов второй темы дистанционного курса по оптическим нанотехнологиям, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

Можно подчеркнуть, что специфика курса по оптическим нанотехнологиям осуществляется с помощью компьютера с выходом в Интернет. Возможно применение синхронной и асинхронной методик дистанционного обучения в рамках курса дистанционного курса по оптическим нанотехнологиям. Существуют особые формы занятий, применяемых в дистанционном обучении. К ним можно отнести чат-занятия и веб-занятия,

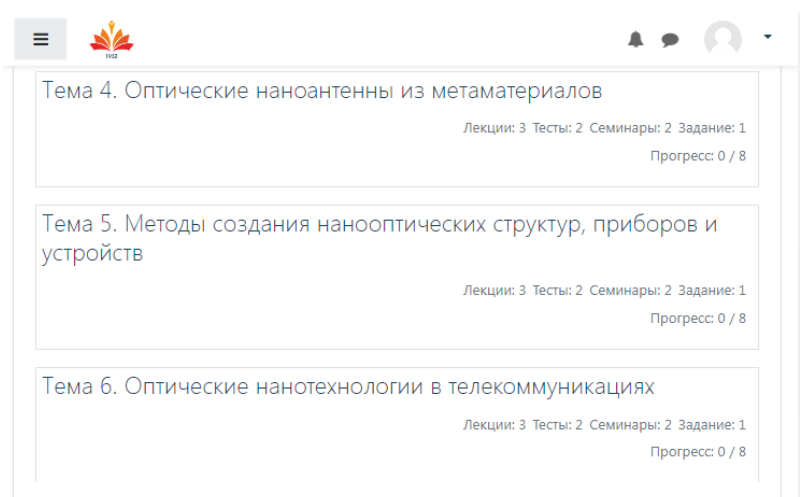


Рис. 2. Страница тематических модулей второй части дистанционного курса по оптическим нанотехнологиям, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

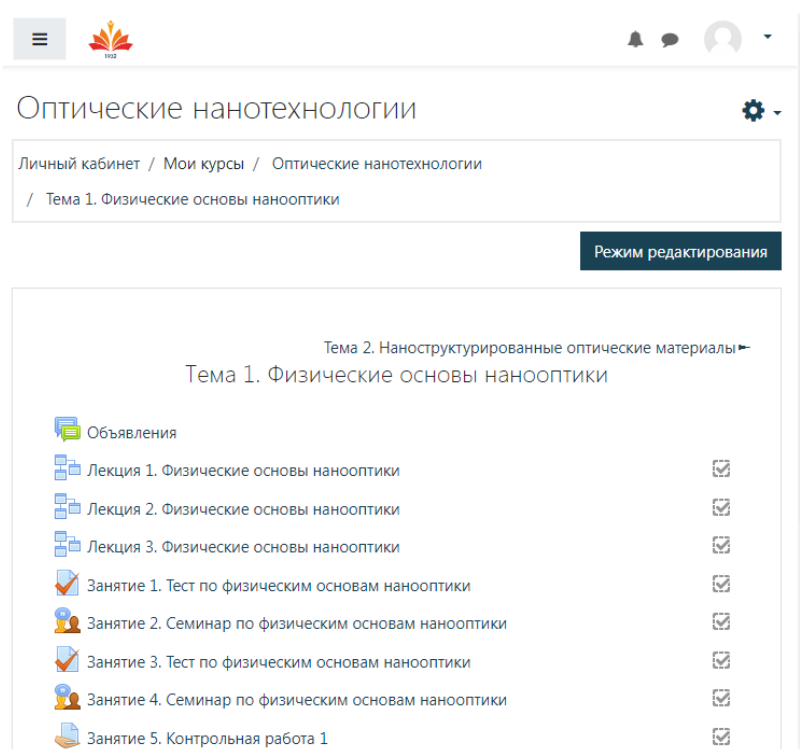


Рис. 3. Страница элементов первой темы дистанционного курса по оптическим нанотехнологиям, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

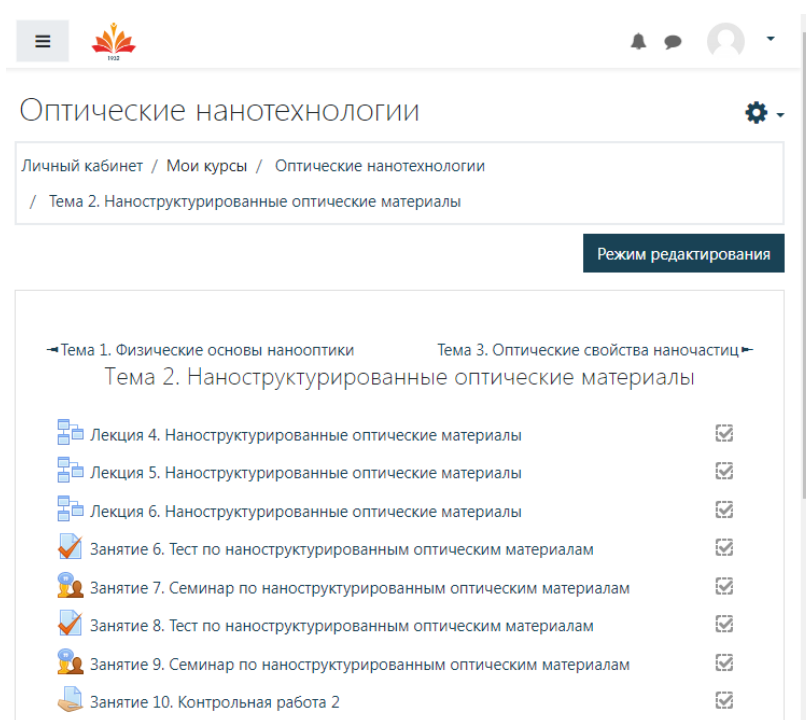


Рис. 4. Страница элементов второй темы дистанционного курса по оптическим нанотехнологиям, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

то есть занятия с использованием современных коммуникационных технологий. Эти типы дистанционных занятий подразумевают текстовое, голосовое или видео-общение при изучении дистанционного курса по оптическим нанотехнологиям. Примером занятия такого типа может послужить проведение видеоконференции для обсуждения заданий дистанционного курса по оптическим нанотехнологиям. Эта форма наиболее приближена к очному обучению, где преподаватель в режиме реального времени передаёт информацию обучающимся, задаёт и отвечает на вопросы по заданиям дистанционного курса по оптическим нанотехнологиям. Для осуществления данного вида уроков существует множество программ таких, как Zoom, Skype для осуществления видеосвязи, интерактивные доски для совместных записей в ходе обсуждения решения задач по оптическим нанотехнологиям. Современные платформы позволяют записывать занятия, чтобы можно было в удобное время пересмотреть, повторить материал, что является несомненным плюсом, по сравнению с традиционным методом аудиторного обучения. Когда невозможно провести онлайн занятия, используется методика асинхронного дистанционного обучения. При применении данной методики больше ответственности за прохождение обучения возлагается на самостоятельность обучающегося. На первый план выдвигается самообучение, индивидуальный темп обучения, а также регулирования темпа обучающегося. Ещё одним положительным моментом дистанционной формы обучения оптическим нанотехнологиям является то, что обучающиеся могут выполнять задания в удобное для них время с необходимыми перерывами.

Разработка дистанционного курса по оптическим нанотехнологиям в системе управления обучением MOODLE является динамичным процессом, требующим междисциплинарного подхода, сочетания педагогических и технологических решений для создания качественного дистанционного курса.

Заключение

Результаты разработки дистанционного курса по оптическим нанотехнологиям вносят вклад в развитие теории и методики дистанционного обучения в области нанотехнологий.

Выводы по работе можно сформулировать следующим образом:

1. проведённый анализ литературы по фундаментальным и прикладным исследованиям оптических нанотехнологий показал актуальность темы исследования,
2. дистанционный курс по оптическим нанотехнологиям в системе управления обучением MOODLE включает как теоретические модули, так и задания по оптическим нанотехнологиям и нанофотонике,
3. дистанционный курс по оптическим нанотехнологиям готов к использованию в образовательных программах педагогического университета с профилем по физике и математике, или с профилем по физике и информатике.

Показано, что разработка дистанционного курса по оптическим нанотехнологиям в системе управления обучением MOODLE является динамичным процессом, который требует междисциплинарного подхода, сочетания педагогических и технологических решений для создания качественного образовательного продукта.

Гипотеза исследования, состоящая в том, что если использовать специализированный дистанционный курс по оптическим нанотехнологиям, интегрирующий теоретические материалы и практические задания, то можно повысить эффективность изучения оптических нанотехнологий, подтверждена полностью.

Задачи работы решены полностью.

Теоретические материалы курса по оптическим нанотехнологиям систематизировали и актуализировали знания о нанофотонике. Исследование дополняет педагогическую науку новыми подходами к разработке дистанционных курсов в области высокотехнологичных дисциплин по нанотехнологиям.

Разработанный курс по оптическим нанотехнологиям может быть внедрён в программы высшего образования, что позволит расширить доступ к обучению в области нанотехнологий.

Список использованных источников

1. Lee Yeon Ui. Optical nanoscopy enabled by nanophotonics // Physics and high technology. — 2023. — mar. — Vol. 32, no. 3. — P. 10–15. — URL: <http://dx.doi.org/10.3938/phit.32.006>.
2. Nayfeh Munir H. Optics in nanotechnology // Optics in our time. — Springer International Publishing, 2016. — P. 223–264. — ISBN: 9783319319032. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-31903-2_10.
3. Prospects for the use of nanotechnology for the manufacture of optical metanaterials / D. O. Volpyan [et al.] // International journal of engineering and technology. — 2018. — dec. — Vol. 7, no. 4.36. — P. 69–71. — URL: <http://dx.doi.org/10.14419/ijet.v7i4.36.23314>.
4. Fainman Y. Nanostructured elements in active and passive optical technologies // OSA Optical design and fabrication 2021 (Flat optics, freeform, IODC, OFT). — Flatoptics. — Optica Publishing Group, 2021. — P. FTu3C.1. — URL: <http://dx.doi.org/10.1364/FLATOPTICS.2021.FTu3C.1>.

5. Electronic and electro-optic nanotechnology / Yaser Dahman [et al.] // Nanotechnology and functional materials for engineers.— Elsevier, 2017.— P. 191–206.— ISBN: 9780323512565.— URL: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-323-51256-5.00009-5>.
6. Application of optical fiber nanotechnology in power communication transmission / Hongsheng Yu [et al.] // Alexandria engineering journal.— 2020.— dec.— Vol. 59, no. 6.— P. 5019–5030.— URL: <http://dx.doi.org/10.1016/J.AEJ.2020.09.025>.
7. Optical nanomaterials and enabling technologies for high-security-level anticounterfeiting / Wei Ren [et al.] // Advanced materials.— 2019.— jun.— Vol. 32, no. 18.— URL: <http://dx.doi.org/10.1002/ADMA.201901430>.
8. Advanced optical nanosensors / Juan Matmin [et al.] // Handbook of Nanosensors.— Springer Nature Switzerland, 2023.— oct.— P. 1–36.— ISBN: 9783031163388.— URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-031-16338-8_30-1.
9. Li Zhi-Yuan. Optics and photonics at nanoscale: Principles and perspectives // EPL (Europhysics Letters).— 2015.— mar.— Vol. 110, no. 1.— P. 14001.— URL: <http://dx.doi.org/10.1209/0295-5075/110/14001>.
10. DiGiovanni David J., Li Ming-Jun, Willner Alan E. Fiber optic nanotechnology: a new frontier of fiber optics // Nanophotonics.— 2013.— dec.— Vol. 2, no. 5–6.— P. 311–313.— URL: <http://dx.doi.org/10.1515/NANOPH-2013-0053>.
11. Raghava Swita, Goel Gaurav, Kompella Uday B. Ophthalmic applications of nanotechnology // Ocular transporters in ophthalmic diseases and drug delivery.— Humana Press, 2008.— P. 415–435.— ISBN: 9781597453752.— URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-1-59745-375-2_22.
12. Laser, nanoparticles, and optics / Parvathy Nancy [et al.] // Nano-Optics.— Elsevier, 2020.— P. 47–65.— ISBN: 9780128183922.— URL: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-818392-2.00004-4>.
13. Sargent E. H. Nanotechnology for optical networks // 2006 Optical fiber communication conference and the national fiber optic engineers conference.— IEEE, 2006.— P. 1–3.— URL: <http://dx.doi.org/10.1109/OFC.2006.215884>.
14. Optical nanotechnology-based sensors for environmental contaminants' detection / Ramachandra Naik [et al.] // Nanotechnology-based sensors for detection of environmental pollution.— Elsevier, 2024.— P. 137–153.— ISBN: 9780443141188.— URL: <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-443-14118-8.00008-5>.
15. Nanophotonics: nanoscale optical science and technology / Paras N. Prasad [et al.] // Frontiers of nano-optoelectronic systems.— Springer Netherlands, 2000.— P. 1–10.— ISBN: 9789401008907.— URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-94-010-0890-7_1.
16. Nano-optics for healthcare applications / Blessy Joseph [et al.] // Nano-Optics.— Elsevier, 2020.— P. 33–46.— ISBN: 9780128183922.— URL: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-818392-2.00003-2>.
17. Jun Bong-Hyun. Synthesis and application of optical nanomaterials // Nanomaterials.— 2024.— nov.— Vol. 14, no. 23.— P. 1904.— URL: <http://dx.doi.org/10.3390/nano14231904>.

18. Nanophotonics for integrated information systems / Uriel Levy [et al.] // Optoelectronic integrated circuits VIII / Ed. by Louay A. Eldada, El-Hang Lee. — Vol. 6124. — SPIE, 2006. — feb. — P. 612404. — URL: <http://dx.doi.org/10.1117/12.655704>.
19. Nanophotonics: materials and devices / Uriel Levy [et al.] // Quantum sensing and nanophotonic devices / Ed. by Manijeh Razeghi, Gail J. Brown. — Vol. 5359. — SPIE, 2004. — jul. — P. 126. — URL: <http://dx.doi.org/10.1117/12.516209>.
20. Fainman Y. Ultrafast and nanoscale optics // Conference on lasers and electro-optics/international quantum electronics conference. — CLEO. — OSA, 2009. — P. CThF4. — URL: <http://dx.doi.org/10.1364/CLEO.2009.CThF4>.
21. Nanophotonics: fundamentals, challenges, future prospects and applied applications / Muhammad Aamir Iqbal [et al.] // Nonlinear optics - nonlinear nanophotonics and novel materials for nonlinear optics. — IntechOpen, 2022. — mar. — ISBN: 9781839628368. — URL: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.98601>.
22. Fainman Y. Nanophotonics technology and applications // 2013 IEEE avionics, fiber-optics and photonics technology conference (AVFOP). — IEEE, 2013. — oct. — P. 61–62. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/AVFOP.2013.6661623>.
23. A brief introduction to optical nanoprobe / Lingxin Chen [et al.] // Novel optical nanoprobe for chemical and biological analysis. — Springer Berlin Heidelberg, 2014. — P. 1–7. — ISBN: 9783662436240. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-43624-0_1.
24. Gu Qing, Fainman Yeshaiahu. Nanophotonics technology and applications // 2013 Conference on lasers and electro-optics pacific rim (CLEOPR). — IEEE, 2013. — jun. — P. 1–2. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/CLEOPR.2013.6600059>.
25. Карасева П. П. Разработка онлайн-курса по физике наносистем и наноустройств в современных технологиях // Наука online. — 2024. — № 3 (28). — С. 39–51. — URL: <http://nauka-online.ru/wp-content/uploads/2024/09/03282024-003.pdf>.
26. Алтуний К. К., Колесова Т. А. Разработка элементов дистанционного курса по физической нанoeлектронике в системе управления обучением MOODLE // Наука online. — 2022. — № 1 (18). — С. 88–112. — URL: <https://elibrary.ru/dutung>.
27. Алтуний К. К., Шленкина Е. А. Разработка информационной системы поддержки изучения темы по оптике метаматериалов в составе курса по нанооптике // Наука online. — 2022. — № 2 (19). — С. 75–88. — URL: <https://elibrary.ru/pticsm>.
28. Алтуний К. К., Лебедев А. А. Разработка дистанционного курса по нанофизике в системе управления обучением MOODLE // Наука online. — 2022. — № 2 (19). — С. 60–74. — URL: <https://elibrary.ru/mpcxsb>.
29. Алтуний К. К., Сорокина Е. О. Разработка материалов занятия по оптике нанокomпозитных материалов в курсе по оптике тонкослойных и наноструктурных покрытий // Наука online. — 2022. — № 2 (19). — С. 18–30. — URL: <https://elibrary.ru/wgfhkb>.
30. Алтуний К. К. Разработка компьютерного сопровождения изучения темы по спайзерам в курсе нанооптики // Наука online. — 2018. — № 4 (5). — С. 74–93. — URL: <https://elibrary.ru/pvxfxn>.

31. Алтунин К. К., Петрова Е. А. Разработка модульной структуры дистанционного курса «Оптика метаматериалов» в системе управления обучением MOODLE // Наука online. — 2019. — № 1 (6). — С. 50–70. — URL: <https://elibrary.ru/pgpsft>.
32. Алтунин К. К., Карташова А. А. Разработка электронного образовательного ресурса по солнечной энергетике // Наука online. — 2019. — № 2 (7). — С. 15–32. — URL: <https://elibrary.ru/omnoyk>.
33. Сорокина Е. С. Результаты создания сайта по электрическим явлениям в курсе физики основной школы // Наука online. — 2022. — № 3 (20). — С. 109–124. — URL: <http://nauka-online.ru/wp-content/uploads/2023/01/03202022-007.pdf>.

Сведения об авторах:

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

E-mail: selyukova2003810@gmail.com

ORCID iD  0009-0003-6886-9490

Web of Science ResearcherID  ISA-2143-2023

Original article
 PACS 01.40.Di
 OCIS 000.2060
 MSC 00A79

Development of a distance learning course on optical nanotechnology

A. D. Selukova 

Ulyanovsk State Pedagogical University, 432071, Ulyanovsk, Russia

Submitted June 17, 2025

Resubmitted June 25, 2025

Published September 30, 2025

Abstract. The results of developing a distance learning course on optical nanotechnology in the learning management system MOODLE are presented. The aim of the study is to describe the process of developing a distance learning course on optical nanotechnology in the learning management system MOODLE. The results of developing the structure and elements of the distance learning course on optical nanotechnology in the learning management system MOODLE are described. The length of the distance learning course on optical nanotechnology is 6 credits or 216 hours.

Keywords: nanotechnology, nanoelectronics, photonics, distance learning course, distance learning, learning management system, personnel training

References

1. Lee Yeon Ui. Optical nanoscopy enabled by nanophotonics // Physics and high technology. — 2023. — mar. — Vol. 32, no. 3. — P. 10–15. — URL: <http://dx.doi.org/10.3938/phit.32.006>.
2. Nayfeh Munir H. Optics in nanotechnology // Optics in our time. — Springer International Publishing, 2016. — P. 223–264. — ISBN: 9783319319032. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-319-31903-2_10.
3. Prospects for the use of nanotechnology for the manufacture of optical metanaterials / D. O. Volpyan [et al.] // International journal of engineering and technology. — 2018. — dec. — Vol. 7, no. 4.36. — P. 69–71. — URL: <http://dx.doi.org/10.14419/ijet.v7i4.36.23314>.
4. Fainman Y. Nanostructured elements in active and passive optical technologies // OSA Optical design and fabrication 2021 (Flat optics, freeform, IODC, OFT). — Flatoptics. — Optica Publishing Group, 2021. — P. FTu3C.1. — URL: <http://dx.doi.org/10.1364/FLATOPTICS.2021.FTu3C.1>.
5. Electronic and electro-optic nanotechnology / Yaser Dahman [et al.] // Nanotechnology and functional materials for engineers. — Elsevier, 2017. — P. 191–206. — ISBN: 9780323512565. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-323-51256-5.00009-5>.

6. Application of optical fiber nanotechnology in power communication transmission / Hongsheng Yu [et al.] // Alexandria engineering journal. — 2020. — dec. — Vol. 59, no. 6. — P. 5019–5030. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/J.AEJ.2020.09.025>.
7. Optical nanomaterials and enabling technologies for high-security-level anticounterfeiting / Wei Ren [et al.] // Advanced materials. — 2019. — jun. — Vol. 32, no. 18. — URL: <http://dx.doi.org/10.1002/ADMA.201901430>.
8. Advanced optical nanosensors / Juan Matmin [et al.] // Handbook of Nanosensors. — Springer Nature Switzerland, 2023. — oct. — P. 1–36. — ISBN: 9783031163388. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-031-16338-8_30-1.
9. Li Zhi-Yuan. Optics and photonics at nanoscale: Principles and perspectives // EPL (Europhysics Letters). — 2015. — mar. — Vol. 110, no. 1. — P. 14001. — URL: <http://dx.doi.org/10.1209/0295-5075/110/14001>.
10. DiGiovanni David J., Li Ming-Jun, Willner Alan E. Fiber optic nanotechnology: a new frontier of fiber optics // Nanophotonics. — 2013. — dec. — Vol. 2, no. 5–6. — P. 311–313. — URL: <http://dx.doi.org/10.1515/NANOPH-2013-0053>.
11. Raghava Swita, Goel Gaurav, Kompella Uday B. Ophthalmic applications of nanotechnology // Ocular transporters in ophthalmic diseases and drug delivery. — Humana Press, 2008. — P. 415–435. — ISBN: 9781597453752. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-1-59745-375-2_22.
12. Laser, nanoparticles, and optics / Parvathy Nancy [et al.] // Nano-Optics. — Elsevier, 2020. — P. 47–65. — ISBN: 9780128183922. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-818392-2.00004-4>.
13. Sargent E. H. Nanotechnology for optical networks // 2006 Optical fiber communication conference and the national fiber optic engineers conference. — IEEE, 2006. — P. 1–3. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/OFC.2006.215884>.
14. Optical nanotechnology-based sensors for environmental contaminants' detection / Ramachandra Naik [et al.] // Nanotechnology-based sensors for detection of environmental pollution. — Elsevier, 2024. — P. 137–153. — ISBN: 9780443141188. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-443-14118-8.00008-5>.
15. Nanophotonics: nanoscale optical science and technology / Paras N. Prasad [et al.] // Frontiers of nano-optoelectronic systems. — Springer Netherlands, 2000. — P. 1–10. — ISBN: 9789401008907. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-94-010-0890-7_1.
16. Nano-optics for healthcare applications / Blessy Joseph [et al.] // Nano-Optics. — Elsevier, 2020. — P. 33–46. — ISBN: 9780128183922. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-818392-2.00003-2>.
17. Jun Bong-Hyun. Synthesis and application of optical nanomaterials // Nanomaterials. — 2024. — nov. — Vol. 14, no. 23. — P. 1904. — URL: <http://dx.doi.org/10.3390/nano14231904>.
18. Nanophotonics for integrated information systems / Uriel Levy [et al.] // Optoelectronic integrated circuits VIII / Ed. by Louay A. Eldada, El-Hang Lee. — Vol. 6124. — SPIE, 2006. — feb. — P. 612404. — URL: <http://dx.doi.org/10.1117/12.655704>.

19. Nanophotonics: materials and devices / Uriel Levy [et al.] // Quantum sensing and nanophotonic devices / Ed. by Manijeh Razeghi, Gail J. Brown. — Vol. 5359. — SPIE, 2004. — jul. — P. 126. — URL: <http://dx.doi.org/10.1117/12.516209>.
20. Fainman Y. Ultrafast and nanoscale optics // Conference on lasers and electro-optics/international quantum electronics conference. — CLEO. — OSA, 2009. — P. CThF4. — URL: <http://dx.doi.org/10.1364/CLEO.2009.CThF4>.
21. Nanophotonics: fundamentals, challenges, future prospects and applied applications / Muhammad Aamir Iqbal [et al.] // Nonlinear optics - nonlinear nanophotonics and novel materials for nonlinear optics. — IntechOpen, 2022. — mar. — ISBN: 9781839628368. — URL: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.98601>.
22. Fainman Y. Nanophotonics technology and applications // 2013 IEEE avionics, fiber-optics and photonics technology conference (AVFOP). — IEEE, 2013. — oct. — P. 61–62. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/AVFOP.2013.6661623>.
23. A brief introduction to optical nanoprobe / Lingxin Chen [et al.] // Novel optical nanoprobe for chemical and biological analysis. — Springer Berlin Heidelberg, 2014. — P. 1–7. — ISBN: 9783662436240. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-43624-0_1.
24. Gu Qing, Fainman Yeshaiahu. Nanophotonics technology and applications // 2013 Conference on lasers and electro-optics pacific rim (CLEOPR). — IEEE, 2013. — jun. — P. 1–2. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/CLEOPR.2013.6600059>.
25. Karaseva P. P. Development of an online course on the physics of nanosystems and nanodevices in modern technologies // Science online. — 2024. — no. 3 (28). — P. 39–51. — URL: <http://nauka-online.ru/wp-content/uploads/2024/09/03282024-003.pdf>.
26. Altunin K. K., Kolesova T. A. Development of elements of a distance learning course on physical nanoelectronics in the learning management system MOODLE // Science online. — 2022. — no. 1 (18). — P. 88–112. — URL: <https://elibrary.ru/dutumg>.
27. Altunin K. K., Shlenkina E. A. Development of an information system to support the study of the topic of metamaterials as part of a course on nanooptics // Science online. — 2022. — no. 2 (19). — P. 75–88. — URL: <https://elibrary.ru/pticsm>.
28. Altunin K. K., Lebedev A. A. Development of a distance learning course on nanophysics in the learning management system MOODLE // Science online. — 2022. — no. 2 (19). — P. 60–74. — URL: <https://elibrary.ru/mpcxsb>.
29. Altunin K. K., Sorokina E. O. Development of lesson materials on the optics of nanocomposite materials in a course on the optics of thin-film and nanostructured coatings // Science online. — 2022. — no. 2 (19). — P. 18–30. — URL: <https://elibrary.ru/wgfhkb>.
30. Altunin K. K. Development of computer support for studying the topic of spasers in a course on nanooptics // Science online. — 2018. — no. 4 (5). — P. 74–93. — URL: <https://elibrary.ru/pvxfxn>.
31. Altunin K. K., Petrova E. A. Development of a modular structure for the distance learning course “Optics of metamaterials” in the learning management system MOODLE // Science online. — 2019. — no. 1 (6). — P. 50–70. — URL: <https://elibrary.ru/pgpsft>.

32. Altunin K. K., Kartashova A. A. Development of an electronic educational resource on solar energy // Science Online. — 2019. — no. 2 (7). — P. 15–32. — URL: <https://elibrary.ru/omnoyk>.
33. Sorokina E. S. Results of creating a website on electrical phenomena in a basic school physics course // Science online. — 2022. — no. 3 (20). — P. 109–124. — URL: <http://nauka-online.ru/wp-content/uploads/2023/01/03202022-007.pdf>.

Information about authors:

Anastasia Denisovna Selyukova — 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: selyukova2003810@gmail.com

ORCID iD  0009-0003-6886-9490

Web of Science ResearcherID  ISA-2143-2023

Секция 2

Физические науки

2.1 Оптика

Научная статья

УДК 538.915

ББК 22.37

ГРНТИ 29.19.22

ВАК 1.3.8.

PACS 75.30.Ds

OCIS 350.4238

MSC 82D45

Моделирование физических свойств структур спинтроники

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 12 июля 2025 года

После переработки 14 июля 2025 года

Опубликована 30 сентября 2025 года

Аннотация. Рассматривается задача распространения спиновой волны в структуре спинтроники. Работа направлена на активное исследование спиновой степени свободы в твердотельных структурах спинтроники. Исследовалась спиновая волна, которая является волной намагниченности в магнитоупорядоченных веществах. Созданная теоретическая модель на основе уравнения Блоха позволяет описать физический процесс распространения спиновых волн в структурах спинтроники и стейнтроники. Показано, что разработанная компьютерная программа позволяет численно решать систему уравнений Блоха для описания динамики спиновой волны в структурах спинтроники. Получены графики зависимости усреднённого спина в структурах спинтроники как функции времени.

Ключевые слова: спиновая волна, спинтроника, спин, уравнения Блоха, моделирование, численные расчёты

¹E-mail: kostya_altunin@mail.ru

Введение

Спинтроника или спиновая электроника является направлением квантовой электроники и физики твёрдого тела, в котором ключевую роль играют спин и спиновые токи. Спинтроника представляет собой новое направление физики твёрдого тела, основанное на использовании спина электрона в качестве носителя информации наряду с электрическим зарядом электрона. Стейнтроника развивает концепцию спинтроники, добавляя управление деформацией кристаллической решётки для манипулирования спиновыми состояниями. Развитие спинтроники является ключевым направлением современной физики конденсированного состояния, определяющим прогресс в создании новых оптоэлектронных приборов и устройств. Актуальность исследования обусловлена стремительным развитием спинтроники как наиболее перспективной технологии для дальнейшего совершенствования элементной базы информационных систем, что требует детального понимания фундаментальных физических процессов в спинтронных структурах.

Целью работы является комплексное исследование фундаментальных физических свойств структур спинтроники.

Задачи работы могут быть сформулированы следующим образом:

1. написать обзор научной литературы по современным исследованиям физических свойств структур спинтроники,
2. создать теоретическую модель для описания физических процессов распространения спиновых волн в структурах спинтроники,
3. разработать компьютерную программу для численного решения уравнения Блоха в структурах спинтроники.

Объектом исследования является класс структур спинтроники. Предметом исследования являются совокупность физических свойств структур спинтроники на основе магнитных материалов.

В данной работе применяются современные методы научного исследования, включая теоретические методы расчёта физических характеристик и численные методы моделирования физических процессов спинтроники, а также компьютерные методы моделирования физических процессов спинтроники.

Материалы исследования включают в себя магнитные материалы спинтроники.

Гипотеза научного исследования заключается в том, что если провести компьютерное моделирование спиновой волны в структурах спинтроники, то можно прогнозировать физические свойства спинтронных устройств для хранения, передачи и обработки цифровой информации.

Научная новизна исследования заключается в том, что впервые исследованы совместные эффекты спиновых и электронных состояний в структурах спинтроники и разработаны оригинальные методы управления спиновыми состояниями.

Теоретическая значимость исследования состоит в том, что исследование расширит понимание физических процессов в структурах спинтроники, что позволит разработать новые теоретические модели.

Практическая значимость исследования состоит в возможности использования полученных результатов для разработки новых высокочувствительных датчиков, элементов памяти с произвольным доступом, спиновых диодов и транзисторов, а также спиновых процессоров нового поколения. Результаты также могут быть использованы при создании энергоэффективных устройств памяти и логических элементов нового поколения.

Обзор физических свойств структур спинтроники

Спинтронные структуры и системы демонстрируют уникальные физические свойства, в первую очередь связанные с переносом электронного спина. Ключевые эффекты включают гигантское магнитосопротивление, туннельное магнитосопротивление и спиновый крутящий момент, которые улучшают возможности обработки и хранения данных. На эти свойства влияют качество интерфейсов и чистота материала, поскольку рассеяние с переворотом спина должно быть минимизировано для сохранения целостности данных. Кроме того, геометрия этих наноструктур тщательно контролируется в наномасштабе, что имеет решающее значение для их функциональности в современных электронных устройствах.

Спинтроника является новой областью физических исследований, сосредоточенных исследовании динамики спин-поляризованного электронного тока через границы разделов магнитных сред и вблизи материалов с электронными структурами, зависимыми от электронных спинов. Спинтроника произвела революцию в области магнитного хранения и имеет потенциал для будущих применений в энергонезависимой памяти и логических устройствах. Структуры спинтроники демонстрируют уникальные физические свойства благодаря своим электронным структурам, зависимым от электронных спинов. Эти свойства структур спинтроники включают способность управлять неравновесными спин-поляризованными популяциями электронов, что повышает эффективность магнитных датчиков и позволяет использовать линейные (резистивные) спинтронные устройства для магнитного считывания @auxrussian@auxenglish[1]. Кроме того, продолжающиеся исследования нелинейного спин-поляризованного электронного транспорта в металлах и полупроводниках предполагают потенциал для новых применений в быстрой энергонезависимой памяти и логических устройствах, что ещё больше расширяет фундаментальные материальные свойства спинтроники.

Структуры спинтроники демонстрируют ряд физических свойств, которые имеют решающее значение для их функциональности и применения в современных электронных устройствах. Эти свойства в первую очередь зависят от спина электронов, а не от их заряда, что позволяет реализовать уникальные явления, такие как гигантское магнитосопротивление и туннельное магнитосопротивление, которые имеют решающее значение для разработки высокочувствительных датчиков магнитного поля и устройств памяти [2]. Структуры спинтроники демонстрируют уникальные физические свойства, такие как доменные микроструктуры, скирмионы и спиновые волны. Структуры спинтроник используют спин-поляризованные токи, на которые влияют такие явления, как гигантское и туннельное магнитосопротивление и спиновый перенос углового момента. Эти свойства позволяют манипулировать спиновыми токами через магнитные поля, механические деформации в мультиферроидных структурах и сверхкороткие оптические импульсы, что делает их более выгодными по сравнению с традиционными полупроводниковыми технологиями для приложений обработки и хранения информации [2]. Такие материалы, как монослойные наноленты MoS_2 , демонстрируют сильную спин-орбитальную связь и прямые запрещённые зоны, которые способствуют высокой спиновой поляризации и управляемости спиновых степеней свободы, что необходимо для устройств на основе спина [3]. Магнитное обменное поле и электростатические барьеры в этих структурах можно изменять для достижения значительных эффектов спиновой фильтрации и переключения, усиливая эффект гигантского магнитосопротивления [3]. В статье [3] построена монослойная зигзагообразная квантовая структура MoS_2 наноленты электрически управляемых ферромагнитных электродов для решения проблемы управления спиновыми степенями свободы по требованию. Физические свойства структур спинтроники, особенно в монослойных дихалькогенидах переходных металлов, таких как MoS_2 , включают прямую запрещённую зону и сильную

спин-орбитальную связь. Эти свойства обеспечивают высокую спиновую поляризацию и управляемость спиновыми степенями свободы, которые необходимы для эффективного спинового транспорта. Исследование подчеркивает значимость магнитного обменного поля и электростатических барьеров в регулировании спинового транспорта, что приводит к таким явлениям, как 100 % спиновая фильтрация и гигантские эффекты магнитосопротивления в квантовых структурах. Кроме того, упорядоченные по вакансиям двойные перовскиты, такие как K_2TcZ_6 , демонстрируют стабильные структуры и ферромагнитные свойства благодаря роли $4d$ -электронов, которые влияют на спиновую поляризацию и температуру Кюри [4]. В статье [4] исследуются вакансионно-упорядоченные двойные перовскиты K_2TcZ_6 ($Z = Cl, Br$) для спинтроники, подчеркивая их стабильные структуры и нетоксичные свойства. Изучаются стабильные структуры, электронные и магнитные характеристики и термоэлектрические эффекты. Эти свойства позволяют использовать такие приложения, как датчики магнитного поля, гальванические изоляторы, считывающие головки, запоминающие устройства с произвольным доступом, переключатели передачи спина и наногенераторы спинового момента. Материалы, используемые в гигантском магнитосопротивлении и туннельном магнитосопротивлении, имеют решающее значение для работы устройства, в то время как трёх-терминальные спинтронные устройства, такие как спиновые транзисторы, изучаются на предмет их фундаментальных физических принципов, подчеркивая их потенциал в будущих исследованиях и приложениях. В статье [4] обсуждается наличие ферромагнетизма, обменных констант и плотности состояний. В статье [4] также исследуются оптические свойства и термоэлектрические характеристики. Ключевые физические свойства включают ферромагнетизм, обусловленный электронным спиновым обменом, характеризующийся плотностью состояний на уровне Ферми и пониманием температуры Кюри. Кроме того, в статье [4] изучаются оптические характеристики, такие как поглощение, диэлектрические постоянные и показатель преломления, а также термоэлектрические эффекты, включая коэффициент Зеебека и электронную проводимость, которые имеют решающее значение для приложений спинтроники. Механические свойства спинтронных материалов также имеют решающее значение, поскольку гибкие магнитные плёнки и гетероструктуры обеспечивают механическую растяжимость и совместимость, которые полезны для разработки портативных и формируемых спинтронных устройств [5]. Эти плёнки можно оптимизировать с помощью механической деформации для улучшения их магнитных и электронных транспортных свойств, что ещё больше расширяет сферу применения спинтроники в потребительской электронике [5]. В статье [6] показано, что спинтронные структуры демонстрируют уникальные физические свойства, такие как гигантское магнитосопротивление и туннельное магнитосопротивление, которые имеют решающее значение для их функциональности. Спинтронные структуры используют степень свободы спина электрона, что обеспечивает нулевую утечку в режиме ожидания, низкое энергопотребление и энергонезависимые характеристики памяти. Кроме того, такие явления, как крутящий момент спиновой передачи, спиновый эффект Холла и магнитная анизотропия, управляемая напряжением, играют важную роль в их работе. Эти свойства способствуют эффективному хранению и обработке данных, делая спинтронные устройства многообещающими альтернативами традиционной CMOS-технологии. В статье [7] обсуждаются основные физические свойства двумерных магнитных материалов, имеющих отношение к спинтронике, включая дальний магнитный порядок в толщине монослоя и слабые межслоевые силы Ван-дер-Ваальса. Эти свойства позволяют манипулировать конфигурациями спинов, что имеет решающее значение для разработки спинтронных устройств. В статье [7] рассматриваются различные двумерные магнитные материалы, такие как CrX_3 , трихалькогениды переходных металлов и магнитные монослои Януса, подчеркивая их потенциал для но-

вых применений в спинтронике посредством эффективных методов модуляции. В статье [8] исследуются физические свойства полуметаллических перовскитов $A\text{FeO}_3$ ($A = \text{Ca}, \text{Sr}, \text{Ba}$), имеющие отношение к спинтронике. Она выявляет металлическое поведение в канале спин-вверх и полупроводниковое поведение в канале спин-вниз, подтверждая полуметаллические характеристики. Целочисленный полный магнитный момент указывает на сильные магнитные свойства, в то время как рассчитанные электронные и оптические свойства предполагают пригодность для спинтронных приложений. Кроме того, структурная стабильность и характеристики связи подтверждают их потенциальное использование в передовых спинтронных устройствах. В статье [9] представлен обзор физики, связанной с протеканием спин-поляризованного тока через магнитные туннельные структуры, включая использование планарной геометрии и применение комбинированных внешних факторов (микроволновое и оптическое излучение). Магнитные туннельные структуры на основе манганита демонстрируют несколько уникальных физических свойств, включая высокую температуру Кюри, высокую спиновую поляризацию электронов проводимости (до 100 %) и высокую химическую стабильность. Эти структуры также демонстрируют хорошо развитую технологию изготовления и устойчивость к внешним возмущениям. Транспортные свойства могут зависеть от таких факторов, как ток смещения, магнитное поле и электромагнитное излучение, что позволяет исследовать явления спин-поляризованного транспорта и разрабатывать инновационные спинтронные устройства.

В статье [10] представлены результаты комплексного подхода к всестороннему анализу структуры, электрического заряда и спина спинтронных материалов и устройств с использованием широкого спектра современных инструментов синхротронного излучения, включая магнитный комптоновский анализ, ядерный резонансный анализ рассеяния, поверхностную и интерфейсную рентгеновскую дифракцию, операндо-анализ нанoeлектронной структуры и фотоэмиссионную спектроскопию. В статье [10] исследуются физические свойства спинтронных материалов с помощью современных методов синхротронного излучения. Эти свойства включают анализ структуры, заряда и спина, которые имеют решающее значение для разработки таких устройств, как энергонезависимая магнитная память и микроволновые генераторы. Такие методы, как магнитный комптоновский анализ, ядерное резонансное рассеяние и фотоэмиссионная спектроскопия, дают представление об электронных и магнитных характеристиках этих материалов, улучшая понимание их функциональности в спинтронных приложениях.

В статье [11] рассматриваются физические явления и основные технические возможности создания различных устройств спинтроники: мазера, р-п-диода с колоссальным магнитосопротивлением, спинового клапана, магнитной линзы, оптических модуляторов, усилителя спиновых волн. Физические свойства спинтронных структур, особенно основанных на магнитных полупроводниках, существенно изменяются в наномасштабе, влияя на механические свойства, теплопроводность и фундаментальные характеристики, такие как температура плавления и Дебая. В магнитных полупроводниках электронная структура радикально изменяется, что приводит к аномалиям магнитных и транспортных свойств. Тонкоплёночные структуры демонстрируют уникальные особенности, которые позволяют применять их в таких устройствах, как лазеры, р-п-переходы с колоссальным магнитосопротивлением, спиновые клапаны и модуляторы инфракрасного излучения, повышая их функциональность в спинтронике.

В статье [12] описаны основные физические свойства сплава FeCrAs , который демонстрирует механическую стабильность, полуметаллический ферромагнетизм и непрямую запрещённую зону в канале спина меньшинства. Он имеет полный магнитный момент, в основном обусловленный атомами Cr, и высокую температуру Кюри около 1000 К. Эти свойства делают сплав FeCrAs перспективным кандидатом для спинтронных при-

ложений, подчёркивая его потенциал в разработке функциональных материалов для современных спинтронных устройств.

В работе [13] подчёркивается, что спинтронные системы манипулируют спином электронов, что приводит к созданию стабильных спиновых кубитов, менее подверженных декогеренции. Спинтронные системы используют спин электронов для создания кубитов и выполнения квантовых операций, предлагая потенциальные преимущества в стабильности, декогеренции и скорости. Спинтронные системы также обеспечивают эффективный контроль взаимодействия кубитов и использование спиновых квантовых вентилей для более быстрых операций.

В статье [14] рассматриваются недавние прорывы, связанные с применением оксидных нанопроводов в спинтронике с точки зрения как кандидатов на материалы, так и изготовления устройств. Физические свойства спинтронных структур, в частности оксидных нанопроводов, значительно отличаются от их объёмных аналогов из-за таких факторов, как превосходная кристалличность, размерные эффекты, поверхностные состояния и нарушенная симметрия. Эти свойства обеспечивают улучшенные функциональные возможности, такие как улучшенный ферромагнетизм, низкое поле магнитосопротивления и поляризованное излучение света. Оксиды переходных металлов демонстрируют ряд поведений от изоляторов до сверхпроводников, что делает их универсальными кандидатами для спинтронных приложений, хотя остаются проблемы в синтезе материалов и изготовлении устройств.

В статье [15] показано, что стохастическая полярность переключения перпендикулярной намагниченности верхнего слоя CoFeB может быть достигнута путём манипулирования направлениями обменного смещения нижнего слоя IrMn/CoFeB , который служит источником энтропии для спинтронного устройства, которое характеризуется высокой энтропией, уникальностью, реконфигурируемостью и цифровым выходом. В статье [15] обсуждаются спинтронные структуры, в частности $\text{IrMn/CoFeB/Ta/CoFeB}$, которые демонстрируют переключение спин-орбита-крутящий момент без поля. Эти структуры используют стохастическую полярность переключения перпендикулярной намагниченности верхнего CoFeB , на которую влияют направления обменного смещения нижнего IrMn/CoFeB . Ключевые физические свойства включают высокую энтропию, уникальность, реконфигурируемость и нулевую частоту битовых ошибок при повторяющихся операциях. Кроме того, они демонстрируют устойчивость к внешним магнитным полям, что делает их подходящими для масштабируемых и энергоэффективных реализаций в приложениях аппаратной безопасности.

В работе [16] рассматриваются некоторые физические свойства структур спинтронных устройств на основе ферромагнитных полупроводников и показывают, что спиновая поляризация такого спин-поляризованного тока может быть обнаружена оптическими средствами с использованием интегрированных светодиодов. В работе [16] обсуждаются спинтронные свойства ферромагнитных полупроводников, подчёркивая их способность генерировать спин-поляризованные токи из-за спонтанного расщепления спинового состояния. Ключевые физические свойства включают высокое туннельное магнитосопротивление в магнитных туннельных переходах на основе $(\text{Ga,Mn})\text{As}$, наличие магнитных доменов, простирающихся почти на миллиметр, и манипулирование доменными стенками спин-поляризованными токами. Кроме того, подчеркивается оптический контроль ферромагнетизма посредством фотогенерированных носителей, демонстрируя взаимодействие между спин-поляризацией и магнитными свойствами в этих материалах.

В целом, разнообразные физические свойства спинтронных структур, от магнитных и электронных характеристик до механической гибкости, подчёркивают их потенциал в революционизации информационных технологий и дизайна спинтронных устройств.

Уникальные свойства спинтроники способствуют развитию мощных технологий квантовых вычислений.

Стрейнтроника является развивающейся инновационной областью физической науки, ориентированной на энергоэффективные вычисления и обработку сигналов с использованием магнитострикционных наномагнетиков, которыми можно манипулировать посредством механической деформации. Этот подход позволяет создавать мало-мощные логические и запоминающие устройства, в которых небольшое напряжение может вызывать достаточную деформацию для переключения состояний намагниченности, что приводит к рассеиванию энергии [17]. В работе [17] разработана стрейнтронные логические вентили и ячейки памяти и извлекли их показатели производительности с помощью моделирования Ландау-Лифшица-Гилберта для прогнозирования беспрецедентной энергоэффективности. Стрейнтроника представляет собой энергоэффективную вычислительную парадигму, использующую наномасштабные мультиферроики, где небольшое напряжение вызывает деформацию в пьезоэлектрическом слое, переключая намагниченность магнитострикционного наномангнетика для логических операций и операций памяти, рассеивая всего несколько аттоджоулей энергии.

Стрейнтроника является областью физической науки, которая управляет намагничиванием магнитострикционных наномангнетов с помощью механической деформации для энергоэффективных приложений. Стрейнтроника обеспечивает энергонезависимое хранение информации, низкоэнергетическую обработку и различные функции, такие как цифровая логика, память и генерация сигналов, продвигаясь к основным технологиям. Энергонезависимая природа этих устройств даёт преимущества по сравнению с традиционными системами на основе заряда, позволяя сохранять данные без питания. Недавние достижения в области стрейнтроники исследовали различные приложения, включая цифровую обработку информации, небулевы вычисления и гибридные системы, которые интегрируют стрейнтронику с магнотроникой. Потенциал стрейнтроники для революции в энергоэффективных технологиях значителен, поскольку это может привести к появлению процессоров, способных работать на собранной окружающей энергии, тем самым устраняя необходимость в батареях [17].

В статье [18] представлена разработанная континуальная теория графена, рассматривающая на равных основаниях как однородную деформацию Коши-Борна, так и микроскопические степени свободы, связанные с двумя подрешётками. В то время как теория восстанавливает все существующие результаты из однородной континуальной теории, уравнение Дирака-Вейля оказывается дополненным новыми псевдокалибровочными и хиральными полями, принципиально отличными от тех, которые возникают в результате однородной деформации. В статье [18] объясняются три поразительных электронных следствия: деформации, отличные от деформаций Коши-Борна, допускают транспортировку поляризованного долиной заряда на произвольно большие расстояния, например, вдоль спроектированного хребта; триаксиальные деформации, необходимые для создания приблизительно однородного магнитного поля, не нужны при деформации, отличной от деформации Коши-Борна; и, наконец, исчезновение эффектов одномерной гофрировки, наблюдаемых в расчётах при релаксации решётки, объясняется как компенсация деформации Коши-Борна и недеформации Коши-Борна.

Сверхбыстрая спиновая динамика, модулированная деформацией, внедренного в экзодраальный борный фуллерен кобальта исследуется с помощью высокоуровневых расчётов. В статье [19] обнаружено, что благодаря своей высокой пластичности и ковкости B_{40} может сохранять свою структуру как при добавлении магнитного атома, так и при воздействии механической растягивающей или сжимающей деформации, и что его модуль упругости является высокоанизотропным. Геометрическая оптимизация показывает, что экзодраальный борный фуллерен предпочитает три различные конфигурации.

Для исследования спиновой динамики в статье [19] сосредоточимся на одной из них, а именно на конфигурации с кобальтом, расположенным вблизи центра семиугольника (единственная геометрия, в которой борная клетка остается нетронутой), в качестве примера для исследования особенностей спиновой динамики. Предлагается несколько сценариев лазерно-индуцированного переворота спина, детали которых сильно зависят от величины и направления любых деформаций. Таким образом, используя связь между внешней механической деформацией и спиновой степенью свободы в магнитных экзоэдральных фуллеренах на основе бора, в статье [19] демонстрируется реализуемость магнитострейнтронных устройств на молекулярных системах. Асимметричная модуляция процесса переворота спина относительно деформации растяжения и сжатия (растяжение-сжатие-асимметричная сверхбыстрая спиновая динамика) может обеспечить дальнейшее управление такими интегрированными спин-логическими устройствами.

Растёт научный интерес к исследованию наноманитных устройств в качестве потенциальных замен электронных устройств (например, транзисторов) в цифровых коммутационных схемах и системах. Особый класс наноманитных устройств переключается с помощью электрически генерируемой механической деформации, что приводит к электрическому управлению магнетизмом. К этой категории относятся стрейнтронные магнитотуннельные переходы. Их мягкие слои состоят из двухфазных мультиферроиков, включающих магнитострикционный слой, упруго связанный с пьезоэлектрическим слоем. В статье [20] показано, что один стрейнтронный магнитотуннельный переход с пассивным резистором может действовать как микроволновый генератор, традиционная реализация которого потребовала бы микроволновых операционных усилителей, конденсаторов и резисторов. Это уменьшает площадь и стоимость устройства, одновременно повышая надёжность устройства. Это аналоговое применение магнитных устройств, в котором магнитные взаимодействия (взаимодействие между анизотропией формы, анизотропией деформации, полем дипольной связи и крутящим моментом спиновой передачи в мягком слое стрейнтронных магнитотуннельных переходов) используются для реализации генератора с уменьшенной площадью.

В статье [21] исследована сверхбыстрая динамика намагничивания отдельных наноманитов, резонансно возбуждаемых поверхностными акустическими волнами, генерируемыми нелокально немагнитными фононными решётками. Используя магнитооптический микроскоп с временным разрешением на эффекте Керра, в статье [21] сообщается о зависимости магнитоупругого резонанса от длины волны поверхностных акустических волн и размера наноманита. В статье [21] показано, что амплитуда прецессии отдельных наноманитов монотонно и нелинейно увеличивается с уменьшением размера образца. Кроме того, для наноманитов ниже критического размера в статье [21] обнаружено, что амплитуда колебаний увеличивается с частотой поверхностных акустических волн. Измерения динамики намагничивания с развёрткой поля показывают, что затухание магнитоупругого резонанса также уменьшается с размером магнита, в конечном итоге достигая минимального значения, определяемого затуханием Гилберта. В статье [21] показано, что акустически управляемая спиновая динамика обладает благоприятными характеристиками масштабирования, что подтверждает идею о том, что эффективные высокочастотные (10–100 ГГц) наномасштабные стрейнтронные устройства, ограниченные только α , возможны.

Модель

Момент импульса электромагнитного поля можно выразить как сумму орбитального момента импульса, который связан с пространственным распределением светового пучка, и спинового момента импульса, который связан с поляризационными свойствами

света. Как электромагнитная энергия и линейный импульс, спиновый момент импульса также удовлетворяет уравнению непрерывности

$$\nabla \cdot J_S + \frac{\partial S}{\partial t} = 0, \quad (1)$$

где S – оптическая плотность спинного момента импульса, а J_S – оптический поток плотности спинного момента импульса. Для монохроматических волн в вакууме усредненная по времени плотность спинного углового момента и плотность потока спинного углового момента имеют вид

$$\langle S \rangle = \frac{1}{16\pi\omega} \text{Im} [\mathbf{E}^* \times \mathbf{E} + \mathbf{H}^* \times \mathbf{H}], \quad (2)$$

$$\langle J_S \rangle = \frac{c}{16\pi\omega} \text{Im} [(\mathbf{E} \cdot \mathbf{H}^*) - \mathbf{E} \otimes \mathbf{H}^* - \mathbf{H}^* \otimes \mathbf{E}], \quad (3)$$

где ω – частота волны, $k = \omega/c$ – волновой вектор, а c – скорость света.

Мы будем называть поток углового момента спина оптическим спиновым током.

Для плоской волны в вакууме плотность оптического спинного тока равна внешнему произведению плотности углового момента спина и групповой скорости $\mathbf{v}_g$

$$\langle J_S \rangle = \frac{1}{2} \langle S \rangle \otimes \mathbf{v}_g. \quad (4)$$

Это выражение позволяет провести аналогии между спином фотона и электронными токами. Электромагнитные волны с одинаковым знаком спинного момента импульса и групповой скорости имеют положительный спиновый ток, и наоборот. Это приводит к следующему наблюдению — суперпозиция двух волн, распространяющихся в разных направлениях, может иметь ненулевой спиновый ток, но при этом нулевой вектор Пойнтинга, если одинаковый знак спинного момента импульса и групповой скорости совпадает для каждой из волн в отдельности. Действительно, для следующей конфигурации поля

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = a_+ \hat{\mathbf{e}}_0 e^{ikz} + a_- \hat{\mathbf{e}}_0^* e^{-ikz}, \quad (5)$$

где $\hat{\mathbf{e}}_0 = (\hat{\mathbf{e}}_x + i\hat{\mathbf{e}}_y)/\sqrt{2}$, а $a_{\pm}$ – комплексные амплитуды, только ненулевые компоненты потока энергии (вектор Пойнтинга) и плотности спинного тока

$$\begin{aligned} \langle \mathbf{P}_z \rangle &= \frac{c}{8\pi} (|a_+|^2 - |a_-|^2), \\ \langle J_{S_{zz}} \rangle &= \frac{c}{16\pi\omega} (|a_+|^2 + |a_-|^2). \end{aligned} \quad (6)$$

Когда амплитуды прямых и обратных распространяющихся волн равны, они образуют стоячую волну, однако спиновый ток отличен от нуля.

Результаты численных расчётов спинных процессов в структурах спинтроники

Спиновые процессы будем описывать с помощью уравнения Блоха в виде

$$\frac{d\mathbf{S}}{dt} = \gamma \mathbf{S} \times (\mathbf{B} + \delta \mathbf{B}) - R \left(\mathbf{S} - \frac{\mathbf{S}_0}{2} \right) - \Gamma_{r0} \mathbf{S}, \quad (7)$$

где $\mathbf{S}$ – усреднённый спин, R – диссипативный член, учитывающий потери энергии, $\gamma = \gamma_e g_s$, $\gamma_e = -e/(2m)$ – гиромагнитное отношение.

Феликс Блох ввёл феноменологические члены затухания. Диссипативный член R , учитывающий потери энергии, находится по формуле

$$R = \begin{pmatrix} \frac{1}{T_2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_1} \end{pmatrix}, \quad (8)$$

где $R_{11} = 1/T_2$, $R_{22} = 1/T_2$, $R_{33} = 1/T_1$, T_1 – время продольной релаксации, T_2 – время поперечной релаксации.

Полная индукция магнитного поля находится по формуле

$$\mathbf{B}_{tot} = \mathbf{B} + \delta\mathbf{B}. \quad (9)$$

Начальное значение спина равно

$$\mathbf{S}_0 = \left(-\frac{1}{2}, 0, 0\right). \quad (10)$$

Запишем систему уравнений Блоха по декартовым компонентам

$$\begin{cases} \frac{dS_x}{dt} = \gamma (S_y (\mathbf{B}_z + \delta\mathbf{B}_z) - S_z (\mathbf{B}_y + \delta\mathbf{B}_y)) - R_{11} \left(S_x - \frac{S_{0x}}{2}\right) - \Gamma_{r0} S_x, \\ \frac{dS_y}{dt} = \gamma (-S_x (\mathbf{B}_z + \delta\mathbf{B}_z) + S_z (\mathbf{B}_x + \delta\mathbf{B}_x)) - R_{22} \left(S_y - \frac{S_{0y}}{2}\right) - \Gamma_{r0} S_y, \\ \frac{dS_z}{dt} = \gamma (S_x (\mathbf{B}_y + \delta\mathbf{B}_y) - S_y (\mathbf{B}_x + \delta\mathbf{B}_x)) - R_{33} \left(S_z - \frac{S_{0z}}{2}\right) - \Gamma_{r0} S_z. \end{cases} \quad (11)$$

В работе составлена компьютерная программа для численного решения системы уравнений (11).

На рис. 1 приведено изображение первой части компьютерной программы на языке Maple для численного решения системы уравнений Блоха, описывающей спиновые волны. Первая часть компьютерной программы на языке Maple для численного решения системы уравнений Блоха, описывающей спиновые волны, включает в себя блок подключения необходимых библиотек расширений, блок описания физических констант и параметров решаемой задачи, блок описания системы уравнений Блоха для спиновой динамики.

На рис. 2 приведено изображение второй части компьютерной программы на языке Maple для численного решения системы уравнений Блоха, описывающей спиновые волны. Вторая часть компьютерной программы на языке Maple для численного решения системы уравнений Блоха, описывающей спиновые волны, включает в себя функции для построения трёхмерных графиков компонент спиновой волны как функции времени.

На рис. 3 приведено изображение третьей части компьютерной программы на языке Maple для численного решения системы уравнений Блоха, описывающей спиновые волны.

Третья часть компьютерной программы на языке Maple для численного решения системы уравнений Блоха, описывающей спиновые волны, включает в себя функции для построения двумерных графиков проекций усреднённого спина в спиновой волне как функции времени.

Приведём результаты численного решения системы уравнений Блоха для спиновой волны с выбранным набором параметров.

На рис. 4 приведено изображение графика зависимости проекции усреднённого спина S_x от времени t для спиновой волны.

На рис. 5 приведено изображение графика зависимости проекции усреднённого спина S_y от времени t для спиновой волны.

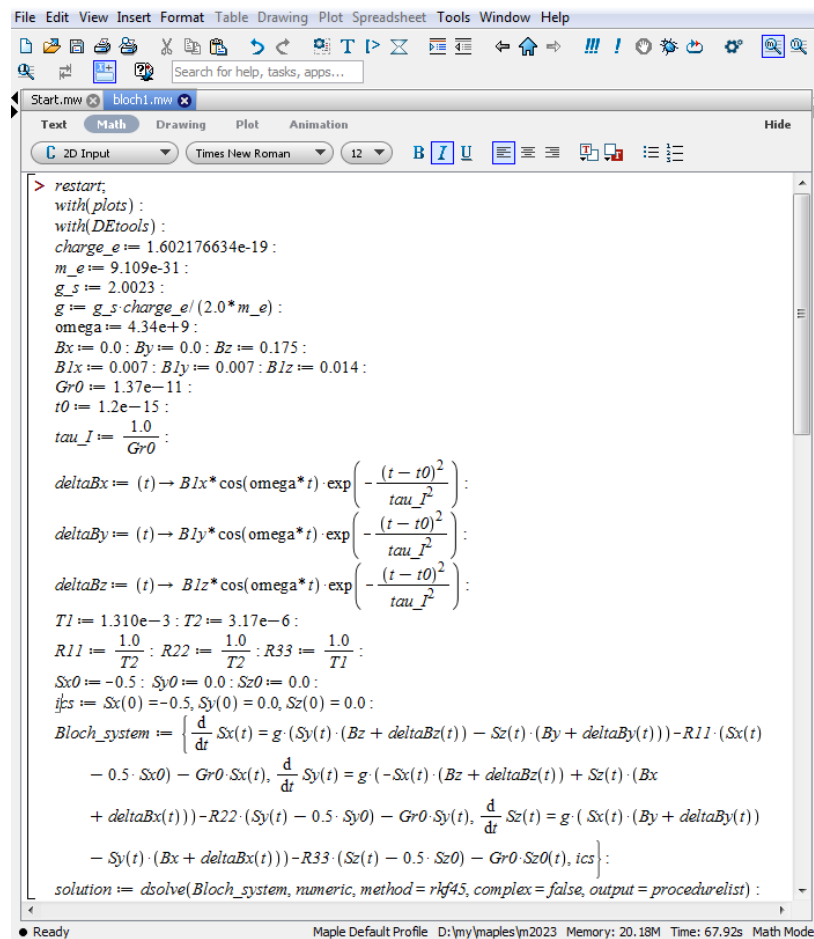


Рис. 1. Первая часть компьютерной программы на языке Maple для численного решения системы уравнений Блоха, описывающей спиновые волны.

На рис. 6 приведено изображение графика зависимости проекции усреднённого спина S_z от времени t для спиновой волны.

На рис. 7 приведено изображение трёхмерного графика зависимости проекций усреднённого спина S_x и S_y от времени t для спиновой волны.

На рис. 8 приведено изображение трёхмерного графика зависимости проекций усреднённого спина S_y и S_z от времени t для спиновой волны.

На рис. 9 приведено изображение трёхмерного графика зависимости проекций усреднённого спина S_x и S_z от времени t для спиновой волны.

Разработанная компьютерная программа позволяет проводить численное решение системы уравнений Блоха для описания динамики спиновой волны в структурах спинтроники с выбранным набором параметров.

Заключение

В работе решена задача распространения спиновой волны в структуре спинтроники. Работа направлена на исследование физического процесса распространения спиновой волны в твердотельных структурах спинтроники. В работе исследовалась спиновая волна, которая является волной намагниченности в магнитоупорядоченных веществах таких, как ферромагнетики, антиферромагнетики и ферримагнетики. В соответствии с принципом корпускулярно-волнового дуализма спиновые волны являются в то же время квазичастицами, которые получили название магнонов.

Выводы по работе можно сформулировать следующим образом:

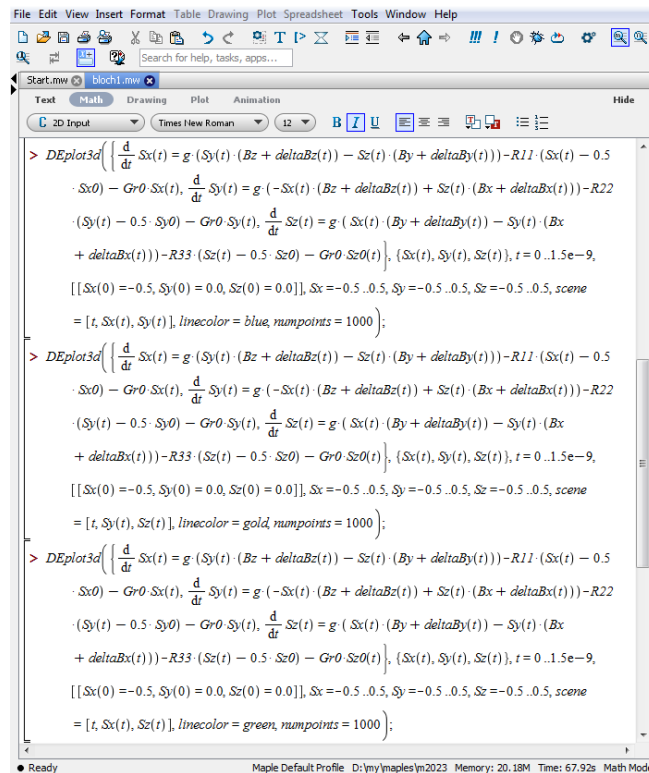


Рис. 2. Вторая часть компьютерной программы на языке Maple для численного решения системы уравнений Блоха, описывающей спиновые волны.

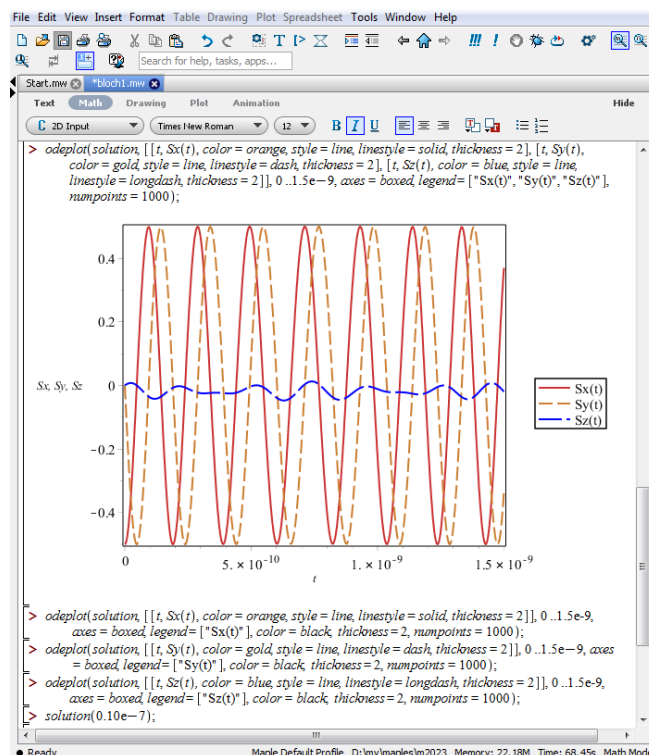


Рис. 3. Третья часть компьютерной программы на языке Maple для численного решения системы уравнений Блоха, описывающей спиновые волны.

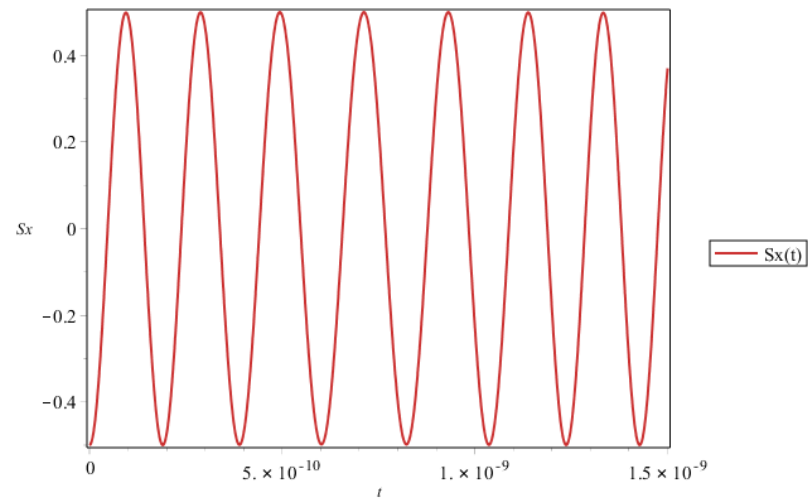


Рис. 4. График зависимости проекции усреднённого спина S_x от времени t для спиновой волны.

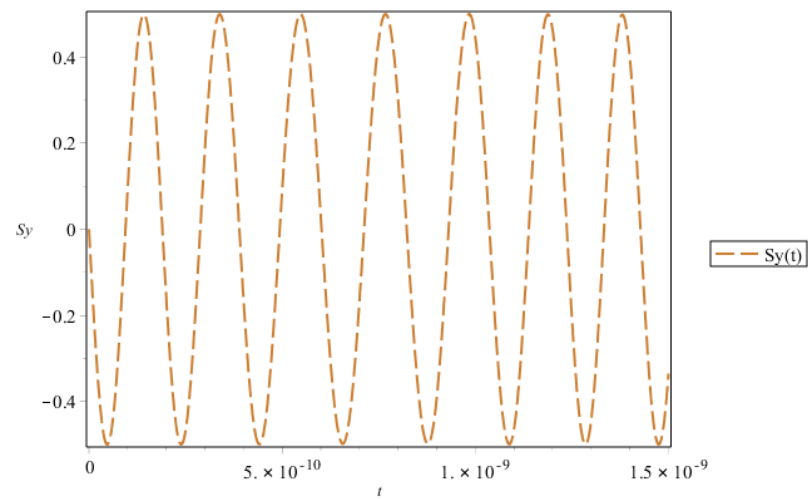


Рис. 5. График зависимости проекции усреднённого спина S_y от времени t для спиновой волны.

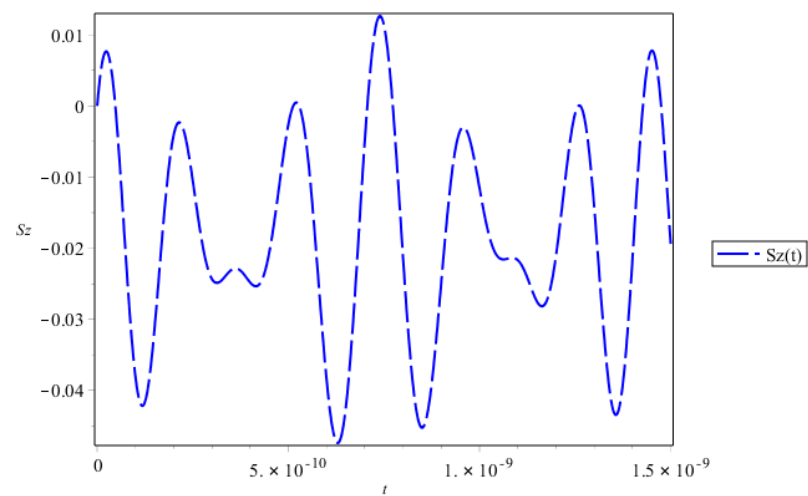


Рис. 6. График зависимости проекции усреднённого спина S_z от времени t для спиновой волны.

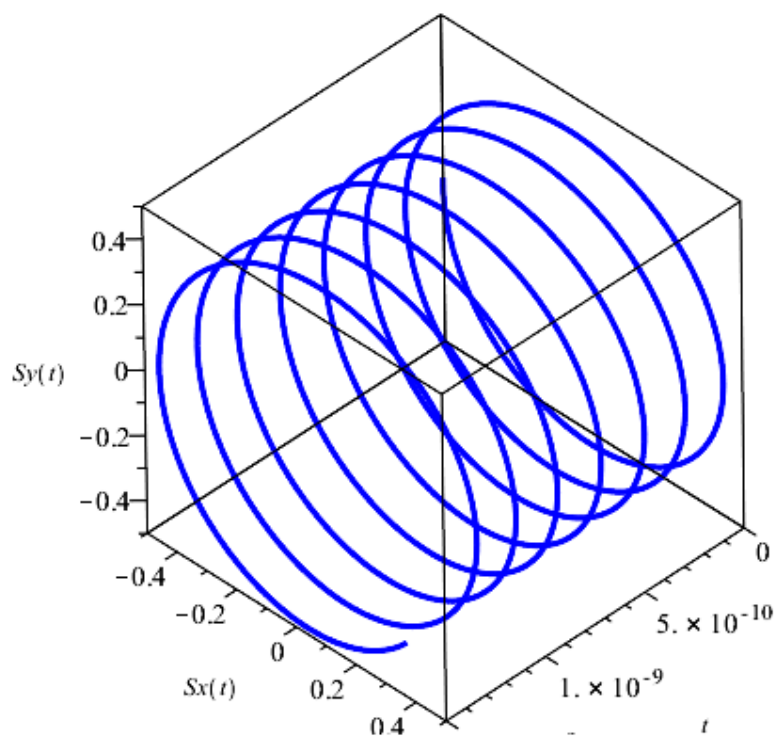


Рис. 7. Трёхмерный график зависимости проекций усреднённого спина S_x и S_y от времени t для спиновой волны.

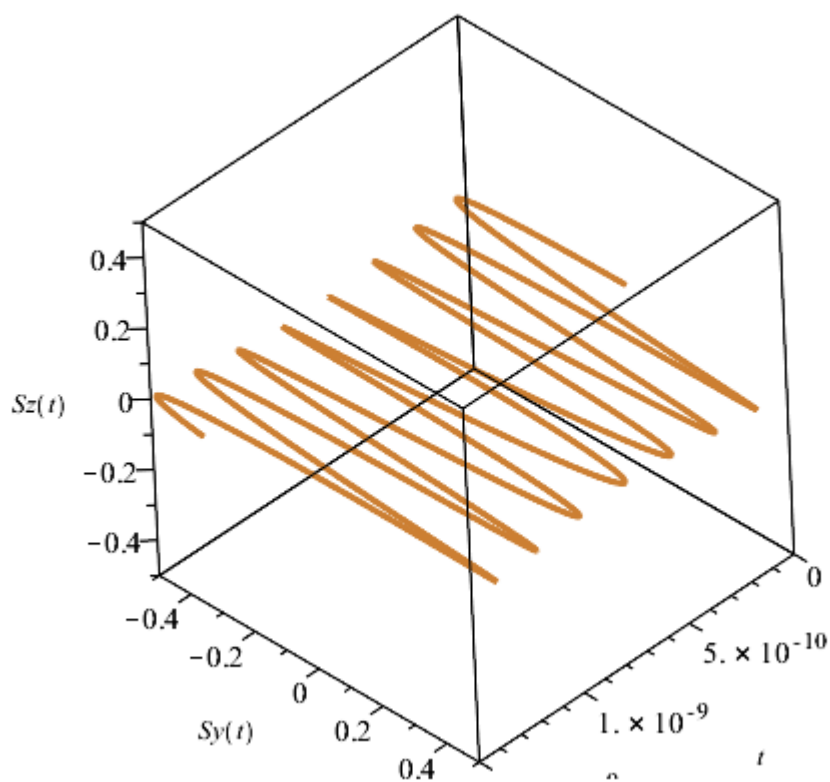


Рис. 8. Трёхмерный график зависимости проекций усреднённого спина S_y и S_z от времени t для спиновой волны.

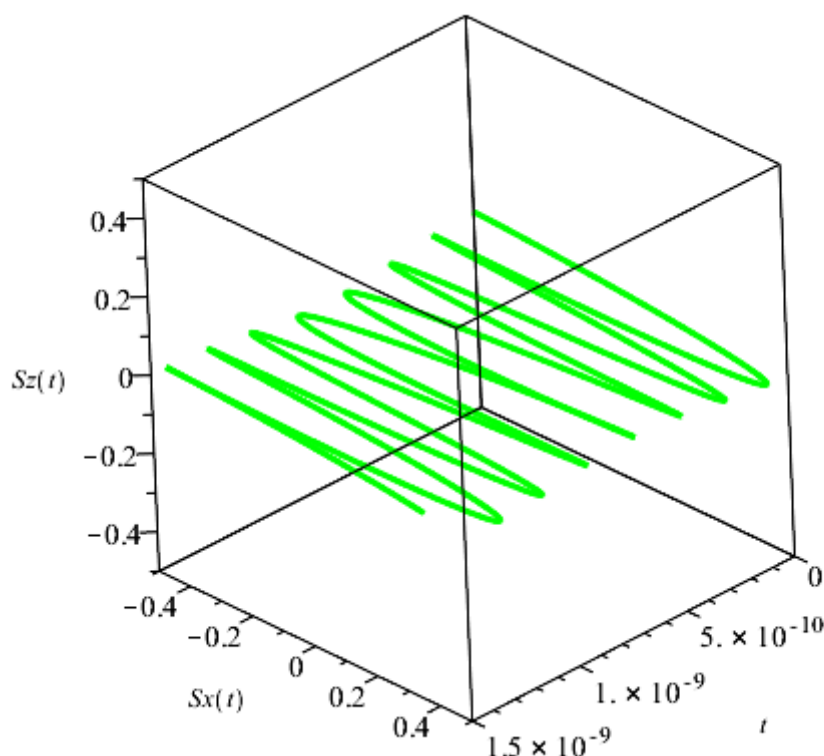


Рис. 9. Трёхмерный график зависимости проекций усреднённого спина S_x и S_z от времени t для спиновой волны.

1. в результате анализа научной литературы установлена актуальность исследования физических свойств структур спинтроники,
2. созданная теоретическая модель на основе уравнения Блоха позволяет описать физический процесс распространения спиновых волн в структурах спинтроники и стейнтроники,
3. показано, что разработанная компьютерная программа позволяет численно решать систему уравнений Блоха для описания динамики спиновой волны в структурах спинтроники,
4. получены графики зависимости усреднённого спина в структурах спинтроники как функции времени.

Задачи работы решены полностью.

Гипотеза научного исследования, заключающаяся в том, что если провести компьютерное моделирование спиновой волны в структурах спинтроники, то можно прогнозировать физические свойства спинтронных устройств для хранения, передачи и обработки цифровой информации, подтверждена полностью.

Результаты исследования могут быть использованы при разработке энергоэффективных устройств памяти нового поколения и логических элементов для применения в суперкомпьютерах.

Список использованных источников

1. Flatte Michael E. Spintronics // IEEE transactions on electron devices. — 2007. — may. — Vol. 54, no. 5. — P. 907–920. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/ted.2007.894376>.

2. Fetisov Yuri V., Sigov Alexander S. Spintronics: physical foundations and devices // Radioelectronics. Nanosystems. Information technologies. — 2018. — dec. — Vol. 10, no. 3. — P. 343–356. — URL: <http://dx.doi.org/10.17725/RENSIT.2018.10.343>.
3. Spin-switching effect and giant magnetoresistance in quantum structure of monolayer MoS₂ nanoribbons with ferromagnetic electrode / Ming-Mei Zhang [et al.] // Acta Physica Sinica. — 2023. — Vol. 72, no. 15. — P. 157202. — URL: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.72.20230483>.
4. Physical properties of vacancy-ordered double perovskites K₂TcZ₆ (Z = Cl, Br) for spintronics applications: DFT calculations / Huda A. Alburaih [et al.] // RSC Advances. — 2024. — Vol. 14, no. 3. — P. 1822–1832. — URL: <http://dx.doi.org/10.1039/d3ra07603b>.
5. Chen Xia, Mi Wenbo. Mechanically tunable magnetic and electronic transport properties of flexible magnetic films and their heterostructures for spintronics // Journal of materials chemistry C. — 2021. — Vol. 9, no. 30. — P. 9400–9430. — URL: <http://dx.doi.org/10.1039/D1TC01989A>.
6. Barla Prashanth, Joshi Vinod Kumar, Bhat Somashekara. Spintronic devices: a promising alternative to CMOS devices // Journal of Computational Electronics. — 2021. — jan. — Vol. 20, no. 2. — P. 805–837. — URL: <http://dx.doi.org/10.1007/S10825-020-01648-6>.
7. Two-dimensional magnetic materials for spintronic devices / Mengjuan Mi [et al.] // Materials today nano. — 2023. — dec. — Vol. 24. — P. 100408. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mtnano.2023.100408>.
8. First-principles studies on physical properties for new half-metallic perovskites $\text{A}(\text{FeO}_3)_2$ (A = Ca, Sr, Ba): spintronics and energy harvesting applications / Nazia Erum [et al.] // International journal of quantum chemistry. — 2024. — mar. — Vol. 124, no. 5. — URL: <http://dx.doi.org/10.1002/qua.27363>.
9. Volkov Nikita V. Spintronics: manganite-based magnetic tunnel structures // Physics-Uspekhi. — 2012. — mar. — Vol. 55, no. 3. — P. 250–269. — URL: <http://dx.doi.org/10.3367/UFNE.0182.201203B.0263>.
10. Spintronic materials and their properties investigated by synchrotron radiation / Teruo Ono [et al.] // Vacuum and surface science. — 2022. — may. — Vol. 65, no. 5. — P. 218–223. — URL: <http://dx.doi.org/10.1380/vss.65.218>.
11. Telegin Andrei, Sukhorukov Yurii. Magnetic semiconductors as materials for spintronics // Magnetochemistry. — 2022. — nov. — Vol. 8, no. 12. — P. 173. — URL: <http://dx.doi.org/10.3390/magnetochemistry8120173>.
12. Chibueze T. C., Raji A. T., Ezema F. I. Mechanical stability, electronic and magnetic properties of half-Heusler FeCrAs alloy for spintronics application // Current science and technology. — 2021. — sep. — Vol. 1, no. 2. — P. 1–8. — URL: <http://dx.doi.org/10.15282/CST.V1I2.6880>.
13. Hunagund Shivakumar. Spintronics system: spin polarization and optical characterization // Principles and applications of quantum computing using essential math. — IGI Global, 2023. — sep. — P. 37–53. — ISBN: 9781668475379. — URL: <http://dx.doi.org/10.4018/978-1-6684-7535-5.ch003>.

14. Tian Yufeng, Bakaul Saidur Rahman, Wu Tom. Oxide nanowires for spintronics: materials and devices // *Nanoscale*. — 2012. — Vol. 4, no. 5. — P. 1529. — URL: <http://dx.doi.org/10.1039/C2NR11767C>.
15. Spintronic physical unclonable functions based on field-free spin-orbit-torque switching / Soogil Lee [et al.] // *Advanced materials*. — 2022. — oct. — Vol. 34, no. 45. — URL: <http://dx.doi.org/10.1002/adma.202203558>.
16. Matsukura F., Chiba D., Ohno H. Spintronic properties of ferromagnetic semiconductors // *A treatise*. — Elsevier, 2008. — P. 207–240. — URL: [http://dx.doi.org/10.1016/S0080-8784\(08\)00005-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0080-8784(08)00005-7).
17. Straintronics: strain-switched multiferroic nanomagnets for extremely low energy logic/memory / H. Ahmad [et al.] // 2015 IEEE Nanotechnology materials and devices conference (NMDC). — IEEE, 2015. — sep. — P. 1–3. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/NMDC.2015.7439253>.
18. Straintronics beyond homogeneous deformation / R. Gupta [et al.] // *Physical Review B*. — 2019. — mar. — Vol. 99, no. 12. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.99.125407>.
19. Magneto-straintronics on a Co-coordinating metalloboronfullerene / Jing Liu [et al.] // *Physical Review B*. — 2020. — jul. — Vol. 102, no. 2. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.102.024416>.
20. Abeer Md Ahsanul, Drobitch Justine L., Bandyopadhyay Supriyo. Microwave oscillator based on a single straintronic magnetotunneling junction // *Physical Review Applied*. — 2019. — may. — Vol. 11, no. 5. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevApplied.11.054069>.
21. Towards ultraefficient nanoscale straintronic microwave devices / Mike Jaris [et al.] // *Physical Review B*. — 2020. — jun. — Vol. 101, no. 21. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.101.214421>.

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 75.30.Ds
 OCIS 350.4238
 MSC 82D45

Modeling the physical properties of spintronic structures

K. K. Altunin 

Ulyanovsk State Pedagogical University, 432071, Ulyanovsk, Russia

Submitted July 12, 2025
 Resubmitted July 14, 2025
 Published September 30, 2025

Abstract. The problem of spin wave propagation in a spintronic structure is considered. The work is aimed at actively investigating the spin degree of freedom in solid-state spintronic structures. The spin wave, which is a magnetization wave in magnetically ordered substances, was investigated. A theoretical model based on the Bloch equation allows one to describe the physical process of spin wave propagation in spintronic and spintronic structures. It is shown that the developed computer program enables the numerical solution of a system of Bloch equations to describe spin wave dynamics in spintronic structures. Plots of the average spin in spintronic structures as a function of time are obtained.

Keywords: spin wave, spintronics, spin, Bloch equations, modeling, numerical calculations

References

1. Flatte Michael E. Spintronics // IEEE transactions on electron devices. — 2007. — may. — Vol. 54, no. 5. — P. 907–920. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/ted.2007.894376>.
2. Fetisov Yuri V., Sigov Alexander S. Spintronics: physical foundations and devices // Radioelectronics. Nanosystems. Information technologies. — 2018. — dec. — Vol. 10, no. 3. — P. 343–356. — URL: <http://dx.doi.org/10.17725/RENSIT.2018.10.343>.
3. Spin-switching effect and giant magnetoresistance in quantum structure of monolayer MoS₂ nanoribbons with ferromagnetic electrode / Ming-Mei Zhang [et al.] // Acta Physica Sinica. — 2023. — Vol. 72, no. 15. — P. 157202. — URL: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.72.20230483>.
4. Physical properties of vacancy-ordered double perovskites K₂TcZ₆ (Z = Cl, Br) for spintronics applications: DFT calculations / Huda A. Alburaih [et al.] // RSC Advances. — 2024. — Vol. 14, no. 3. — P. 1822–1832. — URL: <http://dx.doi.org/10.1039/d3ra07603b>.
5. Chen Xia, Mi Wenbo. Mechanically tunable magnetic and electronic transport properties of flexible magnetic films and their heterostructures for spintronics // Journal of materials chemistry C. — 2021. — Vol. 9, no. 30. — P. 9400–9430. — URL: <http://dx.doi.org/10.1039/D1TC01989A>.

6. Barla Prashanth, Joshi Vinod Kumar, Bhat Somashekara. Spintronic devices: a promising alternative to CMOS devices // *Journal of Computational Electronics*. — 2021. — jan. — Vol. 20, no. 2. — P. 805–837. — URL: <http://dx.doi.org/10.1007/S10825-020-01648-6>.
7. Two-dimensional magnetic materials for spintronic devices / Mengjuan Mi [et al.] // *Materials today nano*. — 2023. — dec. — Vol. 24. — P. 100408. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mtnano.2023.100408>.
8. First-principles studies on physical properties for new half-metallic perovskites AFeO_3 (A = Ca, Sr, Ba): spintronics and energy harvesting applications / Nazia Erum [et al.] // *International journal of quantum chemistry*. — 2024. — mar. — Vol. 124, no. 5. — URL: <http://dx.doi.org/10.1002/qua.27363>.
9. Volkov Nikita V. Spintronics: manganite-based magnetic tunnel structures // *Physics-Uspekhi*. — 2012. — mar. — Vol. 55, no. 3. — P. 250–269. — URL: <http://dx.doi.org/10.3367/UFNE.0182.201203B.0263>.
10. Spintronic materials and their properties investigated by synchrotron radiation / Teruo Ono [et al.] // *Vacuum and surface science*. — 2022. — may. — Vol. 65, no. 5. — P. 218–223. — URL: <http://dx.doi.org/10.1380/vss.65.218>.
11. Telegin Andrei, Sukhorukov Yurii. Magnetic semiconductors as materials for spintronics // *Magnetochemistry*. — 2022. — nov. — Vol. 8, no. 12. — P. 173. — URL: <http://dx.doi.org/10.3390/magnetochemistry8120173>.
12. Chibueze T. C., Raji A. T., Ezema F. I. Mechanical stability, electronic and magnetic properties of half-Heusler FeCrAs alloy for spintronics application // *Current science and technology*. — 2021. — sep. — Vol. 1, no. 2. — P. 1–8. — URL: <http://dx.doi.org/10.15282/CST.V1I2.6880>.
13. Hunagund Shivakumar. Spintronics system: spin polarization and optical characterization // *Principles and applications of quantum computing using essential math*. — IGI Global, 2023. — sep. — P. 37–53. — ISBN: 9781668475379. — URL: <http://dx.doi.org/10.4018/978-1-6684-7535-5.ch003>.
14. Tian Yufeng, Bakaul Saidur Rahman, Wu Tom. Oxide nanowires for spintronics: materials and devices // *Nanoscale*. — 2012. — Vol. 4, no. 5. — P. 1529. — URL: <http://dx.doi.org/10.1039/C2NR11767C>.
15. Spintronic physical unclonable functions based on field-free spin-orbit-torque switching / Soogil Lee [et al.] // *Advanced materials*. — 2022. — oct. — Vol. 34, no. 45. — URL: <http://dx.doi.org/10.1002/adma.202203558>.
16. Matsukura F., Chiba D., Ohno H. Spintronic properties of ferromagnetic semiconductors // *A treatise*. — Elsevier, 2008. — P. 207–240. — URL: [http://dx.doi.org/10.1016/S0080-8784\(08\)00005-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0080-8784(08)00005-7).
17. Straintronics: strain-switched multiferroic nanomagnets for extremely low energy logic/memory / H. Ahmad [et al.] // *2015 IEEE Nanotechnology materials and devices conference (NMDC)*. — IEEE, 2015. — sep. — P. 1–3. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/NMDC.2015.7439253>.

18. Straintronics beyond homogeneous deformation / R. Gupta [et al.] // Physical Review B. — 2019. — mar. — Vol. 99, no. 12. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.99.125407>.
19. Magneto-straintronics on a Co-coordinating metalloboronfullerene / Jing Liu [et al.] // Physical Review B. — 2020. — jul. — Vol. 102, no. 2. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.102.024416>.
20. Abeer Md Ahsanul, Drobitch Justine L., Bandyopadhyay Supriyo. Microwave oscillator based on a single straintronic magnetotunneling junction // Physical Review Applied. — 2019. — may. — Vol. 11, no. 5. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevApplied.11.054069>.
21. Towards ultraefficient nanoscale straintronic microwave devices / Mike Jaris [et al.] // Physical Review B. — 2020. — jun. — Vol. 101, no. 21. — URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.101.214421>.

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 531.8

ББК 22.31

ГРНТИ 30.15.15

ВАК 1.3.3.

PACS 47.85.Gj

OCIS 000.6800

MSC 74F10

Моделирование задач авиационной динамики и оптимизации параметров летательных аппаратов в современной авиации

А. В. Синдяев  ¹

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б. П.
Бугаева», 432071, Ульяновск, Россия

Поступила в редакцию 12 августа 2025 года

После переработки 14 августа 2025 года

Опубликована 30 сентября 2025 года

Аннотация. Рассматриваются актуальные проблемы, возникающие при моделировании и проектировании современных летательных аппаратов. Целью работы является разработка и совершенствование математических методов для решения комплексных задач авиационной динамики для оптимизации параметров современных летательных аппаратов. Методы исследования включают математическое моделирование, численные методы решения дифференциальных уравнений, оптимизационные алгоритмы и методы компьютерного анализа динамики летательных аппаратов. Предложена математическая модель, позволяющих более точно описывать динамику полёта летательных аппаратов.

Ключевые слова: аэродинамика, аэродинамическая задача, летательный аппарат, кинематические уравнения Эйлера, динамические уравнения Эйлера, математическое моделирование, проектирование летательных аппаратов

Введение

Современная авиация представляет собой сложную систему, требующую глубокого математического анализа на всех этапах проектирования и эксплуатации. Математические методы играют ключевую роль в решении задач, связанных с обеспечением безопасности, экономичности и эффективности полетов. В условиях развития авиационной техники возникает необходимость совершенствования математических методов проектирования и эксплуатации летательных аппаратов.

Целью работы является разработка и совершенствование математических методов для решения комплексных задач авиационной динамики для оптимизации параметров современных летательных аппаратов. Задачи исследования включают анализ литературы по существующим математическим моделям летательных аппаратов, используемых

¹E-mail: syndyaev@rambler.ru

в авиационной отрасли, разработку метода решения аэродинамической задачи для оптимизации параметров летательных аппаратов.

Объект исследования является совокупность процессов моделирования и проектирования летательных аппаратов. Предметом исследования является математическая модель для процессов моделирования и проектирования летательных аппаратов.

Методы исследования включают математическое моделирование, численные методы решения дифференциальных уравнений, оптимизационные алгоритмы и методы компьютерного анализа. Материалы исследования включают уравнения Навье–Стокса для описания аэродинамических характеристик летательных аппаратов на основе данных о параметрах полёта.

Мотивация исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности и безопасности авиационной техники в условиях постоянного развития технологий и усложнения задач, стоящих перед современной авиацией.

Научная новизна исследования заключается в том, что разработан метод решения аэродинамической задачи на основе усовершенствованной математической модели, позволяющей оптимизировать параметры летательных аппаратов.

Гипотеза исследования заключается в том, что применение современных математических методов позволит повысить эффективность проектирования летательных аппаратов.

Теоретическая значимость исследования заключается в том, что результаты позволят расширить теоретические основы математического моделирования в авиационной отрасли. Практическая значимость исследования заключается в возможности применения полученных результатов при проектировании новых летательных аппаратов, модернизации существующих моделей и совершенствовании систем управления воздушным движением, что способствует повышению безопасности и экономичности авиационных перевозок.

Обзор

Аэродинамические модели предоставляют данные о силах и моментах, необходимые для анализа динамики полёта, прочности конструкции и управления; выбор варьируется от недорогих приближений потенциального течения до полнофункциональных решателей уравнений Навье–Стокса в зависимости от требований к точности. Методы расчёта элементов лопастей и полос рассчитывают силы путём интегрирования двумерных нагрузок на аэродинамический профиль вдоль несущих поверхностей и полезны для роторов и воздушных винтов в работе [1]. Раннее проектирование и прототипирование закона управления на основе потенциального течения или вихревой решётки для быстрой оценки производной устойчивости использовано в работе [1]. Методы сжимаемой решётки используются в связанных аэродинамических расчётах, когда важны нестационарные аэродинамические условия в работе [2]. Предварительные аэроупругие или связанные с управлением испытания: сжимаемая решётка или нестационарная панель при наличии связи и нестационарного следа применено в работе [2]. Сертификация и подробные характеристики для вязкостных эффектов, отрывного течения и поведения при больших углах атаки описаны в работе [3]. Масштабно-разрешающие вычислительные гидродинамики решают уравнения Навье–Стокса с замыканиями турбулентности для вязкого сопротивления, разделения и взаимодействия поверхностей управления; они используются для заполнения аэродинамических баз данных и проверки моделей с низкой точностью в работе [3]. Модели динамики полёта выражают движения жёсткого тела и (опционально) упругого движения и составляют основу моделирования для анализа управляемости, устойчивости и контроля. Уравнения Ньютона–Эйлера для жёсткого тела с шестью степенями свободы с кинематическими соотношениями образуют

основные нелинейные обыкновенные дифференциальные уравнения, используемые для моделирования траектории и управления; линеаризация относительно усечённых точек даёт производные устойчивости и стандартные представления пространства состояний для проектирования систем управления и модального анализа описаны в работе [4]. Пространство состояний систематически обрабатывает взаимодействия и ограничения математических методов моделирования летательных аппаратов, но требует точных моделей для проектирования наблюдателя и датчика, как показано в работе [5]. Проектирование на основе передаточной функции интуитивно понятно и вычислительно просто для контуров, но плохо масштабируется для сильно связанных многопараметрических воздушных судов, как показано в работе [5]. Алгебраические карты движителей и элементы лопастей практичны для моделирования и управления полётом, обладают высокой точностью (модели сжимаемого потока или переходных режимов двигателя), необходимой для режимов отказа двигателя, помпажа и сваливания и переходных режимов описаны в работе [6]. Методы элементов лопастей и импульса вычисляют тягу и крутящий момент ротора и винта путём интегрирования сил сечения (подъёмной силы и сопротивления) вдоль лопастей; явные соотношения между шагом лопасти и тягой или крутящим моментом типичны для моделирования и управления наклонными роторами, как показано в работе [6].

Моделирование динамики летательного аппарата является важной частью разработки современных законов управления и обеспечения безопасности полетов. В статье [7] для решения задачи моделирования продольной динамики с использованием небольшого объёма данных лётных испытаний в условиях больших углов атаки предложен эффективный подход, интегрирующий машинное обучение с физическими механизмами. Во-первых, в статье [7] создаётся низкоточная модель динамики летательного аппарата, основанная на физическом анализе. Во-вторых, в статье [7] разработан автоэнкодер для извлечения временных и пространственных характеристик из истории движения в полёте в условиях больших углов атаки. Эти характеристики затем используются для компенсации ошибок моделирования низкоточной модели с помощью модуля слияния на основе глубокой нейронной сети, что приводит к созданию высокоточной модели динамики летательного аппарата. Кроме того, разработана в статье [7] парадигма многошаговой эволюции динамики летательного аппарата с учетом физики замкнутого контура для построения функций потерь, обеспечивающая стабильную и эффективную оптимизацию параметров высокоточной модели. Наконец, в статье [7] имитационная модель масштабированного самолёта F-16 используется для генерации небольшого набора данных лётных испытаний с большим углом атаки для обучения и тестирования высокоточной модели. В статье [7] экспериментальные результаты показывают, что по сравнению с тремя репрезентативными базовыми методами моделирования динамики самолёта предлагаемый подход обеспечивает более высокую точность моделирования и лучшую обобщающую способность, что подтверждает его расширенные возможности.

Испытание на вибрацию на земле является важнейшим этапом проектирования нового воздушного судна. Испытание включает в себя анализ различных конфигураций нагрузки, что помогает понять реальное поведение конструкции, сертифицировать некоторые экстремальные случаи нагрузки, а также проверить и улучшить конечно-элементную модель, используемую при проектировании. В статье [8] проверка модели конечных элементов осуществляется путём сравнения частотных характеристик, полученных в ходе испытания на вибрацию на земле, и конечно-элементной модели в некоторых точках отклика. В идеале численные и экспериментальные результаты должны согласовываться. Это, безусловно, верно в случае отдельных компонентов, но в случае сборок часто возникают расхождения между численными и экспериментальными результатами, особенно при динамическом анализе. Эти расхождения увеличиваются с увели-

чением числа компонентов в сборке, поскольку соединения обычно недостаточно хорошо представлены в конечно-элементной модели. Компоненты этих сборных конструкций обычно соединены в небольшом количестве точек, и они могут рассматриваться как локальные источники жёсткости и демпфирования. В конечно-элементной модели эти соединения можно представить в виде сосредоточенных пружинно-амортизаторных элементов в упрощенном виде. В статье [8] представлена формулировка уравнения динамического равновесия, использующая отдельный подход для механических свойств соединения сборки. Далее, на основе этой формулировки был разработан процесс оптимизации, использующий свойства соединения в качестве проектных переменных, для определения параметров соединения, которые улучшают согласование между численными и экспериментальными функциями частотной характеристики в случае гармонических возбуждений. В статье [8] этот подход был применён к конечно-элементной модели, представляющей соединение между сегментом фюзеляжа и хвостовым конусом, а также к реальной системе самолёта, для которой доступны экспериментальные данные. Результаты, достигнутые с помощью этой процедуры, весьма эффективны и многообещающие.

В последние годы многие системы управления полетом и отрасли промышленности используют пропорционально-интегрально-дифференциальные регуляторы для улучшения динамического поведения характеристик летательных аппаратов. В статье [9] разрабатывается пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор для повышения устойчивости и производительности системы воздушного судна общего назначения. Проектирование оптимальных параметров пропорционального интегрально-дифференциального регулятора для управления тангажем самолета важно для расширения диапазона безопасности полетов. В статье [9] разработана математическая модель для описания управления продольным тангажем самолета. В статье [9] пропорциональный интегрально-дифференциальный регулятор разработан на основе динамического моделирования системы самолета. Используются различные методы настройки, а именно метод Зейглера-Николса, модифицированный метод Зейглера-Николса, настройка Тайреуса-Льюбена, методы настройки Астрома-Хагглунда. В статье [9] сравниваются характеристики временной области различных методов настройки для получения оптимальных значений параметров. В статье [9] результаты доказывают, что пропорционального интегрально-дифференциального регулятора, настроенного по Зейглеру-Николсу для динамики управления тангажем самолёта, лучше по устойчивости и производительности во всех условиях. Необходимо провести дальнейшие исследования по получению оптимальных параметров пропорционального интегрально-дифференциального регулятора с использованием методов искусственного интеллекта.

В статье [10] описана методика построения адаптивного регулятора для многопараметрических систем, основанная на недавно разработанных методах идентификации и оптимизации. В статье [10] подробно рассмотрено применение метода к системе вертолёта с изменяющимися во времени параметрами. В статье [10] сравнивается реакция адаптивной системы с соответствующей реакцией системы с фиксированным регулятором и системы с оптимальным управлением. В статье [10] показано, что адаптивная система близка к оптимальной.

Рост объёмов авиаперевозок и повышение требований к эффективности требуют совершенствования алгоритмов планирования оптимальных маршрутов полёта воздушных судов. Традиционные методы, такие как алгоритмы A^* , B^* , D^* и Дейкстры, широко используются в навигационных системах, однако имеют ряд ограничений при применении в динамически изменяющейся среде, в частности, из-за необходимости учёта погодных условий, особенностей воздушного движения, экономических факторов и характеристик воздушных судов. В статье [11] представлен комплексный анализ существующих

подходов к оптимизации маршрутов воздушных судов, рассматриваются преимущества и недостатки каждого из них, а также возможные направления их совершенствования. В статье [11] особое внимание уделено многокритериальным параметрам, влияющим на эффективность маршрутизации, таким как расход топлива, безопасность, точность прогнозирования и адаптация к изменяющимся условиям полёта. В статье [11] предложено методическое решение для совершенствования алгоритмов построения маршрутов, заключающееся в учёте изменяющихся параметров в режиме реального времени и их интеграции в современные навигационные системы. Кроме того, в статье [11] с использованием усовершенствованных алгоритмов проведено моделирование оптимальных траекторий полёта, что позволяет повысить эффективность принятия решений в области управления воздушным движением.

Модель

Рассматривается моделирование аэродинамической задачи сложного движения летательного аппарата с использованием кинематических и динамических уравнений Эйлера для описания поступательного и вращательного движения, а также их аналитические решения с использованием конкретных параметров, близких к реальным характеристикам летального аппарата.

Сложное движение летательного аппарата включает в себя поступательное перемещение в пространстве и вращательное движение вокруг центра масс. Для моделирования такого движения используются кинематические уравнения Эйлера, описывающие ориентацию, и динамические уравнения Эйлера, описывающие моменты сил. Учтём аэродинамические силы и моменты. Аналитические решения получены для конкретных параметров: масса $m = 5000$ кг, моменты инерции $I_x = 1500$ кг·м², $I_y = 8000$ кг·м², $I_z = 7000$ кг·м², начальные скорости и углы.

Основой аэродинамического расчёта является система уравнений Навье-Стокса:

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \mathbf{F}, \quad (1)$$

где ρ – плотность, $\mathbf{v}$ – вектор скорости, p – давление, μ – вязкость, $\mathbf{F}$ – главный вектор внешних сил.

Рассмотрим динамику летательного аппарата. Положение летательного аппарата в пространстве определяется углами Эйлера: ϕ – угол крена, θ – угол тангажа, ψ – угол курса. Кинематические уравнения Эйлера связывают угловые скорости с производными углов Эйлера:

$$\dot{\phi} = \omega_x \cos \psi + \omega_y \sin \phi \sin \psi + \omega_z \cos \phi \sin \psi, \quad (2)$$

$$\dot{\theta} = \omega_y \cos \psi - \omega_z \sin \psi, \quad (3)$$

$$\dot{\psi} = -\omega_x \sin \phi + (\omega_y \cos \phi \cos \psi + \omega_z \cos \phi \sin \psi) \frac{1}{\cos \theta}. \quad (4)$$

где ϕ – угол крена, θ – угол тангажа, ψ – угол рыскания, ω_x , ω_y , ω_z – проекции угловой скорости летательного аппарата.

Кинематические уравнения Эйлера описывают изменение ориентации твёрдого тела. Кинематические уравнения Эйлера связывают угловые скорости с производными углов Эйлера. Пусть углы Эйлера: ψ (рыскание), θ (тангаж), ϕ (крен). Матрица перехода от связанной системы координат к инерциальной системе координат имеет вид:

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} \cos \theta \cos \psi & \sin \phi \sin \theta \cos \psi - \cos \phi \sin \psi & \cos \phi \sin \theta \cos \psi + \sin \phi \sin \psi \\ \cos \theta \sin \psi & \sin \phi \sin \theta \sin \psi + \cos \phi \cos \psi & \cos \phi \sin \theta \sin \psi - \sin \phi \cos \psi \\ -\sin \theta & \sin \phi \cos \theta & \cos \phi \cos \theta \end{pmatrix} \quad (5)$$

Угловые скорости в связанной системе: $\omega_x, \omega_y, \omega_z$. Связь с производными углов Эйлера:

$$\begin{pmatrix} \dot{\omega}_x \\ \dot{\omega}_y \\ \dot{\omega}_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & -\sin \theta \\ 0 & \cos \phi & \sin \phi \cos \theta \\ 0 & -\sin \phi & \cos \phi \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} \quad (6)$$

Обратная связь определяется следующим выражением:

$$\begin{pmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \sin \phi \tan \theta & \cos \phi \tan \theta \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi / \cos \theta & \cos \phi / \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{pmatrix} \quad (7)$$

Теперь, кинематические уравнения Эйлера:

$$\dot{\phi} = \omega_x + \tan \theta (\omega_y \sin \phi + \omega_z \cos \phi) , \quad (8)$$

$$\dot{\theta} = \omega_y \cos \phi - \omega_z \sin \phi , \quad (9)$$

$$\dot{\psi} = \frac{\omega_y \sin \phi + \omega_z \cos \phi}{\cos \theta} . \quad (10)$$

Кинематические уравнения Эйлера получаются из определения углов Эйлера и кинематической связи между системами координат. Кинематические уравнения Эйлера описывают эволюцию ориентации летательного аппарата без учёта сил.

Динамические уравнения Эйлера описывают вращательное движение летательного аппарата под действием моментов сил. Для твёрдого тела динамические уравнения Эйлера имеют вид:

$$I_x \dot{\omega}_x + (I_z - I_y) \omega_y \omega_z = M_x , \quad (11)$$

$$I_y \dot{\omega}_y + (I_x - I_z) \omega_x \omega_z = M_y , \quad (12)$$

$$I_z \dot{\omega}_z + (I_y - I_x) \omega_x \omega_y = M_z , \quad (13)$$

где I_x, I_y, I_z – моменты инерции летательного аппарата, M_x, M_y, M_z – моменты сил относительно соответствующих осей в связанной системе. Динамические уравнения Эйлера следуют из второго закона Ньютона для вращательного движения. Члены $(I_z - I_y) \omega_y \omega_z$ – гироскопические эффекты.

Для описания аэродинамических эффектов моменты включают аэродинамические моменты:

$$M_x = M_{x,aero} + M_{x,other} . \quad (14)$$

Аналогично записываются выражения для M_y, M_z .

Аэродинамический момент по крену: $M_{x,aero} = -\frac{1}{2} \rho v^2 S l \delta_a C_{l,\delta_a}$, где δ_a – отклонение элерона, C_{l,δ_a} – коэффициент.

Общий момент определяется по формуле:

$$M_x = Q S b C_l , \quad (15)$$

$$M_y = Q S c C_m , \quad (16)$$

$$M_z = Q S b C_n . \quad (17)$$

где $Q = \frac{1}{2} \rho v^2$, b – размах крыла. Коэффициенты C_l, C_m, C_n зависят от углов атаки α , скольжения β , угловых скоростей и отклонений рулей. Коэффициенты C_l находятся по формуле

$$C_l = C_{l0} + C_{l\alpha} \alpha + C_{l\beta} \beta + C_{lp} \frac{pb}{2v} + C_{lr} \frac{rb}{2V} + C_{l\delta_a} \delta_a + C_{l\delta_r} \delta_r . \quad (18)$$

Аналогично для C_m , C_n . Эти формулы основаны на теории аэродинамики с коэффициентами определяемыми экспериментально. Представленная система уравнений позволяет полностью описать движение летательного аппарата в пространстве, учитывая как вращательные, так и поступательные движения летательного аппарата в пространстве.

Пространственное движение летательного аппарата описывается системой уравнений движения:

$$m\dot{v} = F_x, \quad (19)$$

$$m(\dot{\omega} + v\dot{\beta}) = F_y, \quad (20)$$

$$m(\dot{u} - v\dot{\alpha}) = F_z, \quad (21)$$

где F_x , F_y , F_z – проекции аэродинамических сил. Поступательное движение описывается системой уравнений движения центра масс:

$$m\ddot{x} = F_x, \quad (22)$$

$$m\ddot{y} = F_y, \quad (23)$$

$$m\ddot{z} = F_z - mg, \quad (24)$$

где m – масса летательного аппарата, F_x , F_y , F_z – проекции аэродинамических сил, g – ускорение свободного падения. Подъёмная сила крыла летательного аппарата определяется по формуле:

$$L = \frac{1}{2}\rho v^2 S C_L, \quad (25)$$

где S – площадь крыла летательного аппарата, C_L – коэффициент подъёмной силы.

Для последовательного описания поступательного движения летательного аппарата используются уравнения Ньютона в инерциальной системе отсчёта:

$$m\ddot{x} = F_x, \quad (26)$$

$$m\ddot{y} = F_y, \quad (27)$$

$$m\ddot{z} = F_z - mg, \quad (28)$$

где силы включают тягу, гравитацию, аэродинамические силы.

Аэродинамические силы определяются следующими выражениями:

$$F_x = T \cos \alpha \cos \beta - D \cos \alpha \cos \beta + L \sin \alpha \cos \beta + Y \sin \beta, \quad (29)$$

$$F_y = T \cos \alpha \sin \beta - D \cos \alpha \sin \beta + L \sin \alpha \sin \beta - Y \cos \beta, \quad (30)$$

$$F_z = -T \sin \alpha - D \sin \alpha - L \cos \alpha. \quad (31)$$

Тяга T , подъёмная сила $L = QSC_L$, сопротивление $D = QSC_D$, боковая сила $Y = QSC_Y$. Коэффициенты определяются из выражения:

$$C_L = C_{L0} + C_{L\alpha}\alpha + \dots, \quad (32)$$

аналогично для C_D , C_Y . Эти уравнения получаются проекцией сил на оси. Аэродинамические силы зависят от скорости и ориентации летательного аппарата.

Для простоты рассмотрим плоское движение (без скольжения). Предположим $\beta = 0$, $\phi = 0$, $\psi = 0$, $\dot{\psi} = 0$.

Упрощённые уравнения имеют вид:

$$\dot{\theta} = \omega_y, \quad (33)$$

$$\dot{\psi} = 0. \quad (34)$$

Динамические уравнения имеют вид:

$$I_y \dot{\omega}_y = M_y = QScC_m . \quad (35)$$

Поступательные уравнения имеют вид:

$$m\ddot{V} = \frac{T - D}{m} - g \sin \theta , \quad (36)$$

$$mV\dot{\theta} = \frac{L}{m} - g \cos \theta , \quad (37)$$

где v – скорость, α – угол атаки.

Предположим постоянные коэффициенты: $T = 10000$ Н, $C_L = 0.5$, $C_D = 0.05$, $S = 20$ м², $c = 2$ м, $Q = 0.5 \cdot 1.225 \cdot v^2$ (для $v \approx 50$ м/с).

При поиске аналитического решения для малого угла атаки используется линейная аппроксимация.

Решение для вращения имеет вид:

$$\omega_y(t) = \omega_0 + \int_0^t \frac{M_y}{I_y} dt . \quad (38)$$

Для поступательного движения предположим, что скорость является постоянной величиной, тогда траектория является параболой.

Конкретные параметры: $m = 5000$ кг, $I_y = 8000$ кг·м², начальный угол $\theta = 10^\circ$, $v = 50$ м/с, $\omega_y = 0$.

Решение кинематического уравнения имеет вид:

$$\theta(t) = \theta_0 + \omega_y t . \quad (39)$$

Решение динамического уравнения имеет вид:

$$\omega_y(t) = \omega_0 + (M_y/I_y) t . \quad (40)$$

Предположим, что $M_y = 1000$ Н·м, тогда $\omega_y(t) = 0.125t$ (рад/с). $\theta(t) = 10\pi/180 + 0.125t$ (рад).

Для поступательного движения уравнения имеют вид:

$$x(t) = v t \cos \theta \approx v t , \quad (41)$$

$$z(t) = - (gt^2)/2 + v t \sin \theta \approx v t \sin(10^\circ) - 4.9t^2 . \quad (42)$$

Эти решения получены интегрированием уравнений при постоянных параметрах.

Построим графики решений.

Решены уравнения движения летательного аппарата. Аналитические решения показывают эволюцию ориентации и траектории. Графики иллюстрируют поведение летательного аппарата во время сложного движения.

Заключение

Математическое моделирование является неотъемлемой частью теоретической механики летательных аппаратов. Дальнейшее развитие математических методов позволит решать более сложные задачи проектирования летательных аппаратов. В работе разработан метод решения аэродинамической задачи с применением современных математических методов описания движения летательных аппаратов.

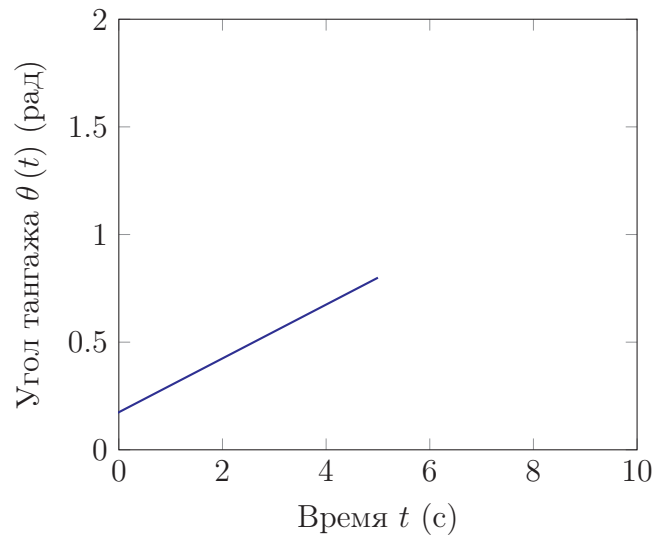


Рис. 1. Изменение угла тангажа $\theta(t)$.

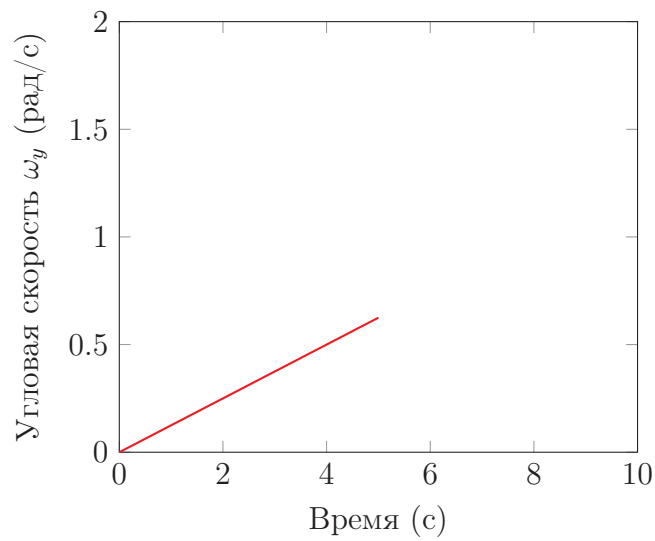


Рис. 2. Изменение угловой скорости $\omega_y(t)$.

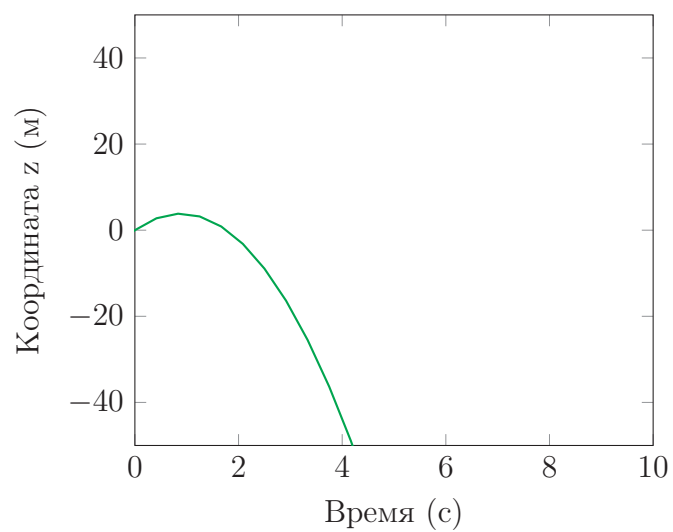


Рис. 3. Траектория по высоте $z(t)$.

Гипотеза исследования, заключающаяся в том, что применение современных математических методов позволит повысить эффективность проектирования летательных аппаратов, полностью подтверждена результатами проведённого исследования.

Теоретическая значимость подтверждена разработкой новой математической модели. Практическая значимость реализована через создание практических рекомендаций использования математической модели для решения аэродинамической задачи. Результаты исследования могут быть использованы при проектировании новых летательных аппаратов и модернизации существующих летательных аппаратов.

Список использованных источников

1. McGovern Seamus M., Cohen Seth B. Survey of contemporary aircraft flight dynamics models for use in airspace simulation // Modeling and simulation for military operations II / Ed. by Kevin Schum, Dawn A. Trevisani. — Vol. 6564. — SPIE, 2007. — apr. — P. 65640V. — URL: <http://dx.doi.org/10.1117/12.719696>.
2. Drela Mark. Integrated simulation model for preliminary aerodynamic, structural, and control-law design of aircraft // 40th Structures, structural dynamics, and materials conference and exhibit. — American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1999. — apr. — URL: <http://dx.doi.org/10.2514/6.1999-1394>.
3. Tan Leon Mark Choon Seng. Computational modeling of the aerodynamic characteristics and flight mechanics and control of an unmanned aerial vehicle : Ph.D. thesis / Leon Mark Choon Seng Tan ; Nanyang Technological University. — 2008. — URL: <http://dx.doi.org/10.32657/10356/41778>.
4. Muhammad Hari, Surastyo Fuad, Sasongko Rianto Adhy. Simulation, parameter identification and control system design of an aircraft using unified mathematical model // ASEAN Engineering Journal. — 2013. — feb. — Vol. 3, no. 1. — P. 5–27. — URL: <http://dx.doi.org/10.11113/AEJ.V3.15381>.
5. Norouzi Masoud, Caferov Elbrus. Investigating dynamic behavior and control systems of the F-16 aircraft: mathematical modelling and autopilot design // International journal of aviation science and technology. — 2023. — dec. — Vol. vm04, no. is02. — P. 75–86. — URL: <http://dx.doi.org/10.23890/ijast.vm04is02.0203>.
6. Wang Xinhua, Cai Lilong. Mathematical modeling and control of a tilt-rotor aircraft // Aerospace science and technology. — 2015. — dec. — Vol. 47. — P. 473–492. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ast.2015.10.012>.
7. Aircraft dynamics modeling at high angle of attack incorporating residual transformer autoencoder and physical mechanisms / Jinyi Ma [et al.] // Aerospace science and technology. — 2025. — may. — Vol. 160. — P. 110045. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ast.2025.110045>.
8. Optimization approach for identification of dynamic parameters of localized joints of aircraft assembled structures / S. Hernandez [et al.] // Aerospace Science and Technology. — 2017. — oct. — Vol. 69. — P. 538–549. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ast.2017.07.026>.
9. Deepa S. N., Sudha G. Longitudinal control of aircraft dynamics based on optimization of PID parameters // Thermophysics and aeromechanics. — 2016. — mar. — Vol. 23, no. 2. — P. 185–194. — URL: <http://dx.doi.org/10.1134/S0869864316020049>.

10. Narendra Kumpati S., Tripathi Shiva S. Identification and optimization of aircraft dynamics // Journal of aircraft. — 1973. — apr. — Vol. 10, no. 4. — P. 193–199. — URL: <http://dx.doi.org/10.2514/3.44364>.
11. Optimizing aircraft routes in dynamic conditions utilizing multi-criteria parameters / Oleh Sydorenko [et al.] // Applied sciences. — 2025. — may. — Vol. 15, no. 11. — P. 6044. — URL: <http://dx.doi.org/10.3390/app15116044>.

Сведения об авторах:

Андрей Васильевич Синдяев — кандидат физико-математических наук, доцент кафедры естественнонаучных дисциплин Ульяновского института гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б. П. Бугаева, Ульяновск, Россия.

E-mail: syndyaev@rambler.ru

ORCID iD  0000-0002-9716-8189

Web of Science ResearcherID  OAJ-9987-2025

SCOPUS ID  6508080812

Original article
 PACS 47.85.Gj
 OCIS 000.6800
 MSC 74F10

Modeling of aircraft dynamics problems and optimization of aircraft parameters in modern aviation

A. V. Sindyaev 

Federal state budgetary educational institution of higher education “Ulyanovsk institute of civil aviation named after chief marshal of aviation B. P. Bugaev”, 432071, Ulyanovsk, Russia

Submitted August 12, 2025
 Resubmitted August 14, 2025
 Published September 30, 2025

Abstract. Current issues arising in the modeling and design of modern aircraft were examined. The aim of the work is to develop and improve mathematical methods for solving complex problems of aviation dynamics to optimize the parameters of modern aircraft. Research methods include mathematical modeling, numerical methods for solving differential equations, optimization algorithms, and computer analysis of aircraft dynamics. A mathematical model is proposed that allows for a more accurate description of aircraft flight dynamics.

Keywords: aerodynamics, aerodynamic problem, aircraft, Euler’s kinematic equations, Euler’s dynamic equations, mathematical modeling, aircraft design

References

1. McGovern Seamus M., Cohen Seth B. Survey of contemporary aircraft flight dynamics models for use in airspace simulation // Modeling and simulation for military operations II / Ed. by Kevin Schum, Dawn A. Trevisani. — Vol. 6564. — SPIE, 2007. — apr. — P. 65640V. — URL: <http://dx.doi.org/10.1117/12.719696>.
2. Drela Mark. Integrated simulation model for preliminary aerodynamic, structural, and control-law design of aircraft // 40th Structures, structural dynamics, and materials conference and exhibit. — American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1999. — apr. — URL: <http://dx.doi.org/10.2514/6.1999-1394>.
3. Tan Leon Mark Choon Seng. Computational modeling of the aerodynamic characteristics and flight mechanics and control of an unmanned aerial vehicle : Ph.D. thesis / Leon Mark Choon Seng Tan ; Nanyang Technological University. — 2008. — URL: <http://dx.doi.org/10.32657/10356/41778>.
4. Muhammad Hari, Surastyo Fuad, Sasongko Rianto Adhy. Simulation, parameter identification and control system design of an aircraft using unified mathematical model // ASEAN Engineering Journal. — 2013. — feb. — Vol. 3, no. 1. — P. 5–27. — URL: <http://dx.doi.org/10.11113/AEJ.V3.15381>.

5. Norouzi Masoud, Caferov Elbrus. Investigating dynamic behavior and control systems of the F-16 aircraft: mathematical modelling and autopilot design // International journal of aviation science and technology. — 2023. — dec. — Vol. vm04, no. is02. — P. 75–86. — URL: <http://dx.doi.org/10.23890/ijast.vm04is02.0203>.
6. Wang Xinhua, Cai Lilong. Mathematical modeling and control of a tilt-rotor aircraft // Aerospace science and technology. — 2015. — dec. — Vol. 47. — P. 473–492. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ast.2015.10.012>.
7. Aircraft dynamics modeling at high angle of attack incorporating residual transformer autoencoder and physical mechanisms / Jinyi Ma [et al.] // Aerospace science and technology. — 2025. — may. — Vol. 160. — P. 110045. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ast.2025.110045>.
8. Optimization approach for identification of dynamic parameters of localized joints of aircraft assembled structures / S. Hernandez [et al.] // Aerospace Science and Technology. — 2017. — oct. — Vol. 69. — P. 538–549. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ast.2017.07.026>.
9. Deepa S. N., Sudha G. Longitudinal control of aircraft dynamics based on optimization of PID parameters // Thermophysics and aeromechanics. — 2016. — mar. — Vol. 23, no. 2. — P. 185–194. — URL: <http://dx.doi.org/10.1134/S0869864316020049>.
10. Narendra Kumpati S., Tripathi Shiva S. Identification and optimization of aircraft dynamics // Journal of aircraft. — 1973. — apr. — Vol. 10, no. 4. — P. 193–199. — URL: <http://dx.doi.org/10.2514/3.44364>.
11. Optimizing aircraft routes in dynamic conditions utilizing multi-criteria parameters / Oleh Sydorenko [et al.] // Applied sciences. — 2025. — may. — Vol. 15, no. 11. — P. 6044. — URL: <http://dx.doi.org/10.3390/app15116044>.

Information about authors:

Andrey Vasilievich Sindyaev — Candidate of physical and mathematical sciences, associate professor of the department of natural sciences at the Ulyanovsk civil aviation institute named after chief air marshal B. P. Bugaev, Ulyanovsk, Russia.

E-mail: sindyaev@rambler.ru

ORCID iD  0000-0002-9716-8189

Web of Science ResearcherID  OAJ-9987-2025

SCOPUS ID  6508080812

Секция 3

Науки о Земле и окружающей среде

3.1 Экономическая, социальная, политическая и рекреационная география

Научная статья

УДК 911.5

ББК 26.8

ГРНТИ 14.35.09

БАК 1.6.13.

PACS 93.30.-w

OCIS 000.2700

MSC 86A04

Геосистемный подход в региональных исследованиях инфраструктуры Приволжского федерального округа

В. Н. Федоров  ¹

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

Поступила в редакцию 27 июля 2025 года

После переработки 29 июля 2025 года

Опубликована 30 сентября 2025 года

Аннотация. Для региональных исследований инфраструктуры предложен геосистемный подход на основе методов, позволивших провести оценку состояния и уровня развития мезоуровневой инфраструктуры, выявить многообразие связей между её компонентами, определить степень её пространственной дифференциации. Используются методы кластеризации, типологии и районирования, призванные не только обобщить и систематизировать полученные данные, но и помочь в решении проблемы диспропорций в развитии инфраструктуры. Основываясь на «мягких» принципах классификации и типологической группировки, автором в пределах Приволжского федерального округа выделены инфраструктурные районы, имеющие свои особенности, которые обусловлены как спецификой социально-экономического развития регионов, так и различиями в территориальной локализации инфраструктурных объектов.

¹E-mail: fedorovw_nik@mail.ru

Ключевые слова: геосистема, геосистемный подход, регион, инфраструктура, региональная инфраструктура, пространственное развитие, кластер, типология, районирование, Приволжский федеральный округ

Введение

Важнейшей задачей географической науки является исследование многообразия взаимосвязей, существующих между пространственно-выраженными элементами природной и социально-экономической системы. Инфраструктура, являясь важнейшей составной частью региональной системы, призвана обеспечить эффективное функционирование производственного процесса, повысить уровень и качество жизни населения. Очевидно, что низкий уровень инфраструктурной оснащённости территории сдерживает деловую активность и, как следствие, ограничивает экономический рост, порождает социальное неравенство и вызывает напряжённость в обществе. В этой связи, геосистемный анализ инфраструктуры нацелен на комплексный подход к решению проблем, вызванных крайней неравномерностью и противоречивостью развития российских регионов, приводящих, в конечном итоге, к их социально-экономической дифференциации. Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки научно-обоснованных подходов к управлению инфраструктурой Приволжского федерального округа с учётом его экономико-географических особенностей, что способствует устойчивому развитию региона.

Целью исследования является определение пространственных закономерностей развития инфраструктуры Приволжского федерального округа на основе геосистемного подхода. Задачи исследования состоят в том, чтобы написать обзор литературы по геосистемному изучению инфраструктуры региона, провести анализ современного состояния инфраструктуры Приволжского федерального округа и выделить ключевые проблемы её функционирования с использованием геосистемного подхода.

Объектом научного исследования является инфраструктура Приволжского федерального округа. Предметом научного исследования является набор пространственных закономерностей формирования и развития инфраструктуры Приволжского федерального округа в региональных исследованиях инфраструктуры Приволжского федерального округа в рамках геосистемного подхода.

Гипотеза исследования заключается в том, что если применять геосистемный подход, то можно выявить пространственные закономерности инфраструктуры Приволжского федерального округа, что будет способствовать сбалансированному развитию инфраструктуры Приволжского федерального округа.

В качестве методов исследования используются методы статистического анализа, кластеризации, типологической группировки, районирования для выявления взаимосвязей между элементами инфраструктуры, геоинформационное картографирование для пространственной визуализации инфраструктурных объектов, статистические методы обработки данных для оценки состояния и уровня развития мезоуровневой инфраструктуры. В качестве материалов исследования используются статистические данные Федеральной службы государственной статистики (Росстат), отчёты отраслевых министерств и ведомств, картографические материалы Приволжского федерального округа.

Научная новизна исследования заключается в том, что разработана классификация инфраструктурных комплексов Приволжского федерального округа на основе геосистемного подхода и статистического анализа для оценки инфраструктурного потенциала региона.

Теоретическая значимость исследования заключается в том, что исследование вносит вклад в развитие методологии геосистемного анализа региональной инфраструк-

туры и расширяет научные представления о территориальной организации экономики Приволжского федерального округа. Практическая значимость исследования заключается в том, что результаты могут быть использованы для планирования инфраструктурных проектов.

Обзор работ по геосистемному изучению инфраструктуры региона

Инфраструктура как объект научного исследования привлекает внимание многих учёных. Однако, несмотря на ряд обширных научных публикаций по инфраструктурной тематике, обоснование возможности использования геосистемного подхода к изучению инфраструктуры остается, к сожалению, неполным и эпизодичным, и весьма отрывочным. Не в полной мере на основе геосистемного подхода обобщен теоретический опыт подобных исследований, крайне поверхностно и односторонне (как по структуре, так и по содержанию) раскрыты условия и факторы, оказывающие решающее влияние на эффективность функционирования инфраструктурных объектов.

Положение усложняется отсутствием единого мнения в трактовке самого понятия «инфраструктура», что объясняется чрезвычайной сложностью, исключительной разветвленностью и неоднородностью рассматриваемой области. Однако, несмотря на разнообразие теоретических подходов к исследованию инфраструктуры, наиболее информативным и широко используемым является геосистемный подход, позволяющий рассмотреть данный объект целостно и всесторонне с учётом характера взаимосвязи и взаимозависимости составляющих его элементов.

Геосистема — это неотъемлемый компонент пространственно-территориальных систем, образующий определенную целостность, единство. Прежде всего, отметим то, что понятие «геосистема», ведённое в научный обиход физиком и географом В. Б. Сочавой [1], включает в себя широкий спектр структурно сочленённых географических объектов, находящихся в определённых пространственно-временных отношениях и топологических связях в пределах географической оболочки.

Смысловое значение слова указывает на его принадлежность к какой-либо территории, в пределах которой локализованы те или иные географические объекты, процессы и явления, сопровождающие их. Следовательно, разработка учения о геосистемах стала вполне закономерным итогом развития географических исследований [2]. Вместе с тем, как отмечает Ю. Н. Гладкий, широкое использование узко трактуемого геосистемного подхода в географической науке нередко способствует дезинтеграционным тенденциям и вовсе не знаменует методологический «прорыв» [3].

Территориальность, безусловно, — важнейшее свойство геосистемы. Взаимодействие инфраструктуры и территории многопланово: инфраструктура мыслится как совокупность физических объектов (зданий, сооружений, инженерных систем, коммуникаций и пр.), обладающих всеми теми же свойствами, которые присущи материальному миру — географической материи, или геоматерии [4]. В силу своих физических характеристик объекты инфраструктуры весьма жёстко «привязаны» к территории, когда в ходе развития общественного производства отдельные виды услуг «обособляются» и «закрепляются» за конкретной территорией.

В общем и целом, геосистемы представляют собой не столько территориальные, сколько пространственные системы. Априорным стало утверждение, что географическое пространство и время — основные формы существования геосистем. Пространственные отношения выражают порядок размещения одновременно существующих географических явлений и протяжённость геосистем. Временные отношения — порядок сменяющих друг друга событий, а также их длительность. В этом ключе А. М. Трофимов, А. И. Чистобаев и М. Д. Шарыгин характеризуют геопространство как совокуп-

ность физических отношений между географическими объектами или их формальными аналогами – географическими системами [5].

Для географического пространства характерно сочетание континуальности (непрерывности) и дискретности (прерывности) [6]. Оставив в стороне обсуждение философских аспектов концепции континуальности — дискретности, отметим, что экстраполирование (перенос знаний из одной области в другую), по сути, является достаточно конструктивным инструментом для анализа пространственной неоднородности инфраструктуры. Одним словом, географические объекты различной природы имеют определённую структуру, основанную на взаимосвязях между элементами, которые рассматриваются как дискретные относительно всей системы.

Происходит понимание того, что система континуальна в силу своей структурно-функциональной целостности, но, тем не менее, построена она на основе дискретных элементов [7]. Континуальность ограничивает разнообразие явлений в природе, в то же время неограниченное возрастание дискретности ведёт к так называемому «дурному» разнообразию [7]. Континуальность — это наиболее приемлемое решение вопроса доступности объектов инфраструктуры, в то же время их пространственные различия, которые рассматриваются как дискретные образования, становятся неким триггером поиска причин нарушения данной нерасчленённости.

Следовательно, геосистемы определяют сущность географического пространства, наполняя его реальным содержанием.

Практика показывает, что в современных условиях любое развитие инфраструктуры становится региональным по существу. В отечественной литературе понятие «регион» трактуется по-разному. Как правило, под регионом понимается часть территории, обладающая общностью природных, социально-экономических, национально-культурных и других условий. Границы региона могут совпадать с границами территории субъекта Российской Федерации, либо объединять территории нескольких её субъектов. Так или иначе, регион представляет собой локализованную территорию, обладающую единством, взаимосвязанностью составляющих элементов.

В силу этого, М. Д. Шарыгин специфику подхода в изучении региона видит в территориально-комплексном его восприятии как объективного целостного образования, имеющего индивидуальные и типологические черты и функционирующего в системе географического пространства–времени [8]. С точки зрения А. И. Зырянова, подобное понимание региона как целостной и весьма динамичной природной и социально-экономической системы является достаточно устоявшейся научной традицией [9].

В исследуемом контексте эффективное развитие региона как интегральной геосистемы во многом обеспечивается инфраструктурой. Речь идёт о сопряжённом и взаимоувязанном развитии её объектов (в перспективе — комплексов) с другими составляющими территориальной системы. Внутренне содержание региона как многомерной системы просматривается во взаимодействии одновременно протекающих природных, экономических и социальных процессов, которые формируют его уникальную пространственно-временную динамику. Подобное высказывание нацеливает на поиск многообразия «возмущающих» факторов объективной и субъективной природы, детерминирующих искомые закономерности [10].

Однако в экономико-географических исследованиях нет общепринятого представления о том, какие из установленных факторов являются более или менее весовыми (значимыми) в используемой системе оценочных процедур. Ряд авторов в целях приведения их к сопоставимому виду предлагают методы взвешивания (введение «весового коэффициента»), экспертных оценок, стандартизации (нормализации) исходных значений и т. д. [11]. В том или ином случае, при взаимодействии множества факторов влияние каждого из них в отдельности теряет свою однозначность, становится нели-

нейным.

Поэтому, чтобы исключить или ослабить (уменьшить) влияние субъективного фактора на конечный результат, следует оперировать лишь наиболее существенными факторами и использовать современные методики и методы, и программные средства математической статистики.

Пространственная организация инфраструктуры во многом определяет конкурентные преимущества территории. Теоретическим постулатом (базовой концепцией) пространственного развития инфраструктуры является её неоднородность, приводящая к формированию дискретных и весьма разнородных геосистем. Именно неравномерность пространственного развития ведёт к деформации регионального пространства и, в конечном итоге, к его поляризации [12]. Отметим, что процесс поляризации нередко отождествляют с сегрегацией, расслоением, дивергенцией, сжатием (локационным и коммуникационным) и фрагментацией (дроблением) пространства, поскольку на противоположном его полюсе просматриваются такие негативные явления, как убыль, депопуляция, экономическая депрессия и т.д. [13]. Следовательно, без оптимальной пространственной организации инфраструктуры невозможно создание действенной и эффективной системы обслуживания. Развития инфраструктура способствует привлечению инвестиций и, следовательно, созданию высоких технологий и повышению конкурентоспособности производимой продукции в виде товаров и услуг.

Подобное видение проблемы позволяет наиболее полно и адекватно проанализировать сущность инфраструктуры, в том числе рыночной, выступающей в качестве регионального капитала и обеспечивающей необходимые условия для функционирования хозяйствующих субъектов и реализации их экономических интересов.

Таким образом, геосистемный подход имеет большое значение для региональных исследований инфраструктуры. Он призван стать ключевым ориентиром для понимания многообразия и специфики исследуемых объектов, установления между ними разного рода связей и отношений. Незаменима его роль в разработке новых исследовательских парадигм, концепций, теорий и методов в области географической науки.

Методы и материалы

Геосистемный подход в региональных исследованиях инфраструктуры ориентирован на раскрытие сущностных характеристик инфраструктуры, принципов и закономерностей её пространственно-временной организации.

В исследовании применялись методы, позволившие провести оценку состояния и уровня развития мезоуровневой инфраструктуры, выявить многообразие связей между её компонентами, определить степень её пространственной дифференциации. Использованы методы кластеризации, типологии и районирования, призванные не только обобщить и систематизировать полученные данные, но и помочь в решении проблемы диспропорций в развитии инфраструктуры.

Методология геосистемного анализа опирается на общую теорию систем и на ряд методов и методических приемов, направленных на раскрытие потенциала развития инфраструктуры и наращивания её ресурсных возможностей. В рамках геосистемного подхода использованы методы статистического анализа, кластеризации, типологической группировки, районирования и т. д.

Информационной базой исследования послужили официальные данные Федеральной службы государственной статистики (Росстат), отчёты отраслевых министерств и ведомств. В статье были использованы материалы публикаций в научных журналах и сборниках, в той или иной степени затрагивающие тему системной организации инфраструктуры, а также результаты аналитических исследований автора.

Системное описание инфраструктуры даёт возможность выделить общие призна-

ки, характерные для всех видов её деятельности, обосновать критерии эффективности пространственного развития и сформировать новые подходы к исследованию.

Результаты

Понятие «геосистема» служит опорной точкой географического исследования инфраструктуры — «поэтажной модели экономики и общества». По содержанию и категориальной «плотности» данная дефиниция обладает не только теоретическим, но и методическим потенциалом, который реализуется во многих направлениях и отраслях географической науки.

В настоящее время нарабатан значительный опыт применения различных методов научного анализа пространственной организации инфраструктуры. Вместе с тем, геосистемный подход позволяет выработать единые методические приемы, связанные с раскрытием её сущностных свойств, признаков, сторон и отношений, и нацеливает на изучение их взаимной зависимости в триаде «природа-население-хозяйство». Именно в этом состоит отличие геосистемной концепции от концепции традиционного подхода к рассмотрению сущностного содержания социо-эколого-экономических систем [14].

Весьма очевидно, что на каждой стадии исследования выбираются и применяются методы, которые (при наилучшем сочетании) позволяют сформировать обоснованную и доказательную базу исследования. Выбор методов во многом определяется спецификой предметной области, её целевыми установками и ценностной ориентацией, влияющих определенным образом на конечный результат.

Несомненно, геосистемный подход не исключает использование арсенала других, традиционных (классических) методов, однако, имеет свои особенности. В контексте настоящего исследования речь идёт о применении синтетических методов, позволяющих, к примеру, провести классификацию объектов инфраструктуры, выявить диспропорции в их развитии, провести типологию и пространственную систематизацию (районирование) по значимому признаку и т.д. Представляется, что подобные вопросы имеет смысл решать на уровне субъектов Российской Федерации, поскольку здесь наиболее зримо просматривается системная архитектура инфраструктуры — её пространственная композиция, степень интеграции с другими структурными и функциональными составляющими региона, а также характер установившихся связей и взаимоотношений между компонентами обслуживаемой ею системы и внешней средой.

Рассмотрим некоторые методологические приемы системного анализа инфраструктуры. Специфика интегрального подхода заключается в том, что исследование опирается на методы математической статистики, позволяющие выявить факторы (главные компоненты) и оценить уровень пространственной дифференциации инфраструктуры на рассматриваемой территории за расчетный период. По этому поводу Л. И. Василевский отмечает, что в исследовательских целях аппарат географизированной статистики явно недостаточен, поскольку при оценке различных измерителей, часто соответствующих разным аспектам явлений, важно учитывать их взаимозависимость [15].

Математические методы становятся всё более популярными, поскольку дают возможность отойти от интуитивного подхода к решению проблемы и в комплексе с традиционными подходами существенно повышают точность и эффективность исследования, корректность формулировок, а также строгость теоретических и методологических изысканий.

Одним из эффективных методов «упорядочивания» регионального пространства и оптимизации, в частности, всей системы организации обслуживания, является кластеризация. Безусловно, в научном сообществе в силу новизны рассматриваемого вопроса нет единого мнения о кластерах как об инструменте пространственного анализа. Практика показывает, что кластерный анализ как многомерная статистическая процедура

позволяет объединить сходные объекты в сравнительно однородные группы (классы, блоки, модули), что упрощает обработку данных. В частности, использование иерархической агломеративной кластеризации методом Варда с применением метрики городских кварталов (манхэттенского расстояния) даёт возможность упорядочить элементы инфраструктуры и решить задачу их классификации.

Кластерный анализ позволил выделить кластеры по заданным параметрам, которые были объединены в две большие группы из кластеров I и II порядков. В свою очередь, выделенные кластеры имеют внутреннюю структуру и делятся на подкластеры. Кластер I порядка охватывает территорию Нижегородской, Самарской областей и Пермского края (подкластер I.1.), а также республики Башкортостан и Татарстан (подкластер I.2.).

Кластер II порядка включает в себя девять регионов Приволжского федерального округа, что составляет 64.3 % от их общего числа. В частности, в подкластер II.1 вошли близкие (схожие) по своим инфраструктурным характеристикам Саратовская и Оренбургская области. Территория Ульяновской, Пензенской областей и Чувашской Республики оказалась в подкластере II.2. Такие субъекты федерального округа как Кировская область и Удмуртская Республика, а также республики Марий Эл и Мордовия составили соответственно подкластеры II.3 и II.4.

Отметим, что классификация нацелена на решение двух основных задач: представить в надёжном и удобном для обозрения и распознавания виде всю изучаемую область и заключить в себе максимально полную информацию о её объектах.

В научных исследованиях классификация тесным образом связана с «систематизацией территориальных единиц, компонентов геосистем, их элементов, свойств и характеристик» [16]. Причём автор справедливо отмечает, что главным здесь является не создание собственно классификации, а разработка научных принципов её построения [16].

Для структурирования полученных данных широко используются метод типологии. Типологическое описание, или сравнение по существенным признакам реализуется на принципах и методах диалектики, позволяющих разделить системный объект на однородные группы в целях их дальнейшей идентификации, описания и сопоставления [17]. По мнению П. А. Булочникова, типологизация является инструментом анализа сущности процессов, протекающих в регионах, которая позволяет определить закономерности их развития, динамику изменений, выявить ориентиры и точки приложения стратегических усилий для будущего развития [18].

В ходе исследования в пределах Приволжского федерального округа Российской Федерации выделены регионы, которые характеризуются разным уровнем развития инфраструктуры. В частности, отмечены группы регионов с высоким, выше среднего, ниже среднего, низким и крайне низким уровнем развития (рис. 1).

Первый тип регионов Приволжского федерального округа Российской Федерации включает группу регионов (подкластер I.2.), инфраструктурный потенциал которых весьма высок — это республики Татарстан и Башкортостан (вторая позиция по сводным показателям, что призвано способствовать их поступательному и устойчивому развитию). Для регионов, входящих в данную группу, направления дальнейшего развития связаны с использованием конкурентных преимуществ, в числе которых относительно выгодное экономическое положение и транспортно-географическое положение. Необходимо признать, что инфраструктурные мощности вышеназванных регионов Приволжского федерального округа используются весьма эффективно, о чём свидетельствуют показатели их социально-экономического положения и развития.

Второй тип регионов включает группу регионов (кластер I.1.) с показателями «выше среднего». Лидирующие позиции в данной группе занимают Самарская область и Перм-

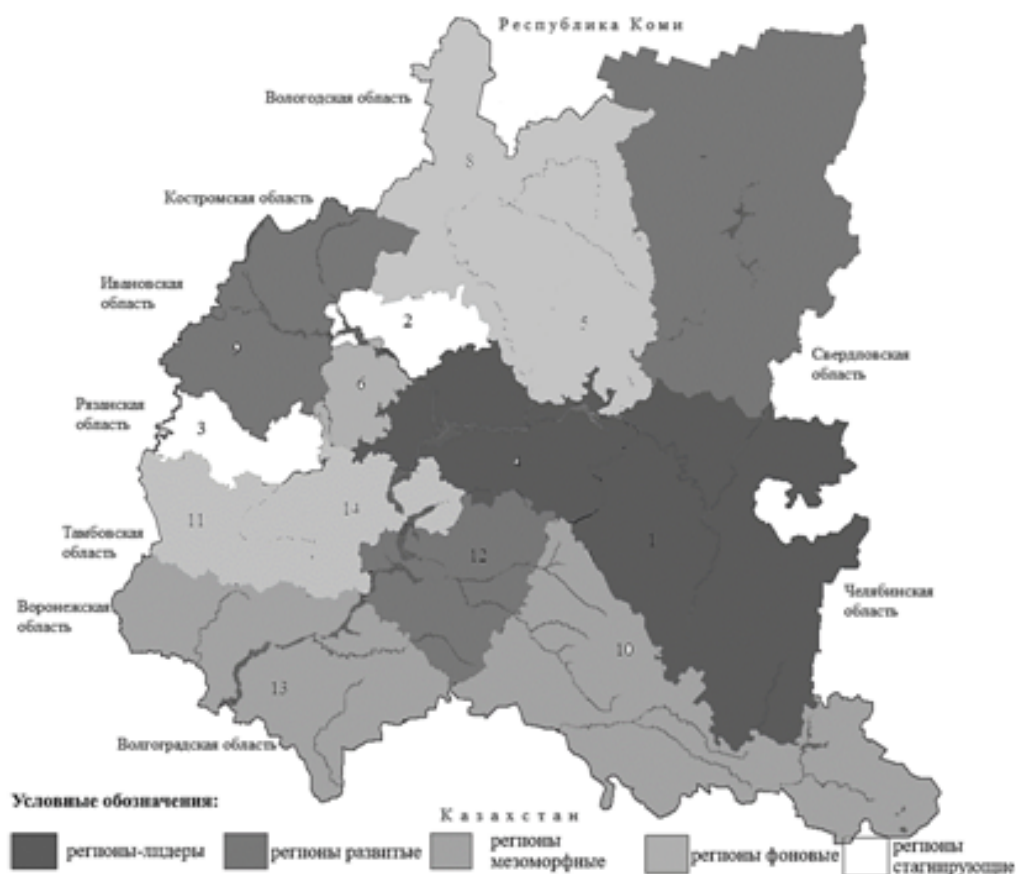


Рис. 1. Типология (типологическая группировка) регионов Приволжского федерального округа Российской Федерации по уровню развития инфраструктуры.

ский край. Отдельной доминантой выступает Нижегородская область. Следовательно, инфраструктурное положение кластеров 1 и 2 типов следует считать весьма благоприятным, а потенциал является высоким. Социально-экономическое развитие регионов, безусловно, связано с активизацией действующих и формированием новых центров инновационной активности.

Третий тип регионов включает группу «мезоморфных» (серединных, опорных) регионов, инфраструктурный потенциал которых следует охарактеризовать как «самодостаточный». К данному типу следует отнести периферийные территории федерального округа — Саратовскую и Оренбургскую области (кластер II.1.), а также Кировскую область и Удмуртскую Республику (кластер II.3.).

Четвёртый тип регионов включает группу «фоновых» регионов, представленных Ульяновской и Пензенской областями, а также Чувашской Республикой (кластер II.2.). Общность их географического положения и хозяйственных структур во многом отражается на социально-экономических показателях развития инфраструктуры.

Пятый тип регионов включает группу регионов-аутсайдеров, тяготеющих к нижней границе диапазона стандартизированных значений. Это национально-территориальные образования — республики Мордовия и Марий Эл (кластер II.4.), которые идентифицируются нами как кризисные, или неблагоприятные. Данные субъекты Приволжского федерального округа попадают в «зону пессимума», где уровень обеспеченности инфраструктурой «ниже среднее» и требует существенной корректировки. Весьма очевидно, что относительно низкий уровень инфраструктурного обустройства неизбежно становится сдерживающим фактором в обеспечении условий для их экономического роста. Со временем такие регионы-аутсайдеры, по мнению экономистов, становятся неудоб-

ными и невыгодными партнерами для основной части территорий.

Судя по всему, модернизация дотационных (низкодоходных) и оживление экономически слабо развитых (стагнирующих) регионов в условиях ограничения инвестиций возможны лишь через «точечный» рост в форме локальных комплексов, ориентированных на выпуск конкурентоспособной продукции и удовлетворения повседневных потребностей населения.

На наш взгляд, переход регионов из одной группы в другую возможен при условии повышения уровня межрегионального взаимодействия, что способствовало бы раскрытию их внутреннего потенциала и достижению специфических конкурентных преимуществ.

Районирование является универсальным методом упорядочения и систематизации динамично развивающихся территориальных систем. Рассматривая районирование как особый случай классификации (по мнению ряда исследователей, классификация, положенная на карту, – это есть районирование), выделяют однородные районы, которые сходны по одному и нескольким признакам, и узловые (нодальные, или поляризованные) районы с доминирующими центрами.

Последние внутренне дифференцированы, различаются по интенсивности связей и имеют ярко выраженную линейно-узловую структуру. Результатом районирования, как известно, является сеть (сетка) районов, которая отражает объективную иерархичность и соразмерность пространственно-выраженных (территориальных) систем (рис. 2).



Рис. 2. Инфраструктурное районирование территории Приволжского федерального округа.

Выделенные в границах Приволжского федерального округа инфраструктурные

районы (Северо-Восточный, Западный, Центральный и Юго-Восточный) характеризуются целостностью, устойчивостью и внутренней однородностью.

Целостность и устойчивость региональной системы обслуживания обеспечиваются посредством определенных взаимосвязей и взаимодействий составляющих её элементов. Однородность в пределах каждого из выделенных районов проявляется в наличии определенных (типологических) признаков. Отметим, что присутствие общих элементов инфраструктуры обеспечивает экономическую «прозрачность» границ, несущих не столько барьерную (разделительную), или ограничительную функции, а сколько контактно-транзитную.

Из этого следует, что инфраструктурный район представляет собой определенное пространственное сочетание («мозаику») кластеров, которые, во всяком случае, концентрируются вокруг ключевой сферы деятельности — услуги, к которой все участники имеют непосредственное отношение, и должны характеризоваться территориальной компактностью (географической близостью), и устойчивостью функционирования.

В общем и целом, районирование является важнейшим этапом в геосистемном исследовании инфраструктуры, поскольку оно выполняет диагностическую (выявление пространственной неоднородности инфраструктуры), классификационную (группировка территорий по доминирующим типам инфраструктурных взаимосвязей) и прогнозную (определение потенциала развития инфраструктуры на основе выявленных пространственных закономерностей) функции.

Заключение

Подытожив вышесказанное, отметим, что инфраструктурное пространство в разрезе отдельных регионов Приволжского федерального округа неоднородно (гетерогенно): его морфологические и структурные элементы в разной степени дискретны (фрагментарны) и мозаичны, о чем свидетельствуют результаты проведенных автором их типологии и площадной дискретизации, которые являются важным методическим приёмом в изучении пространственных закономерностей развития инфраструктуры. Геосистемный анализ подтвердил неравномерность развития инфраструктуры Приволжского федерального округа.

На основе геосистемного анализа представляется возможным установить динамические свойства и закономерности развития инфраструктурных территориальных систем, выявить основные факторы их формирования и выделить особенности архитектурно-пространственной композиции. Основываясь на «мягких» принципах классификации и типологической группировки, автором в пределах Приволжского федерального округа выделены инфраструктурные районы, имеющие свои особенности, которые обусловлены как спецификой социально-экономического развития регионов, так и различиями в территориальной локализации инфраструктурных объектов. Показано, что применяемый автором геосистемный подход в исследовании инфраструктуры в условиях неравномерного развития российских регионов призван обогатить теоретико-методический арсенал географической науки, что в значительной степени расширит её исследовательские возможности. Исследование показало перспективность геосистемного подхода в изучении инфраструктуры Приволжского федерального округа. С помощью геосистемного подхода удалось выявить ключевые пространственные закономерности инфраструктурного развития Приволжского федерального округа. Геосистемный подход позволяет составить наиболее общее представление о развитии региональной инфраструктуры, основанное на учёте взаимосвязи природных, экономических и социальных процессов в контексте их привязки к специфике рассматриваемой территории. Это во многом позволяет закладывать концептуальные основы пространственного развития инфраструктуры, определяет методическую базу для проведения дальнейших исследо-

ваний и помогает решать актуальные задачи прикладного характера.

Гипотеза исследования, заключающаяся в том, что если применять геосистемный подход, то можно выявить пространственные закономерности инфраструктуры Приволжского федерального округа, что будет способствовать сбалансированному развитию инфраструктуры Приволжского федерального округа, подтверждена полностью.

Задачи работы решены полностью.

Практическая ценность исследования заключается в возможности использования полученных данных при планировании региональных инфраструктурных проектов.

Список использованных источников

1. Сочава В. Б. Введение в учение о геосистемах. — Новосибирск : Наука, 1978. — 320 с.
2. Бакланов П. Я. Геосистемный подход в географических исследованиях // Тихоокеанская география. — 2020. — № 1. — С. 7–12.
3. Гладкий Ю. Н. Системный и геосистемный методы в географии: вопросы эффективности использования // Общество. Среда. Развитие. — 2018. — № 4. — С. 72–79.
4. Шарыгин М. Д., Столбов В. А. Теоретико-методологические аспекты поиска законов и закономерностей в общественной географии // Географический вестник. — 2020. — № 1 (52). — С. 22–32.
5. Трофимов А. М., Чистобаев А. И., Шарыгин М. Д. Теория организации пространства. Сообщение I. Географическое пространство-время и структура геообразований // Известия РГО. — 1993. — Т. 125, № 2. — С. 10–19.
6. Ковалев Ю. Ю. Эволюция системного подхода в исследованиях геопространства // Известия РАН. Серия географическая. — 2021. — Т. 85, № 5. — С. 773–784.
7. Протасов А. А. Концепция континуальности-дискретности в гидробиологии и экологии: от речного континуума до биосферы // Историко-биологические исследования. — 2022. — Т. 14, № 1. — С. 11–26.
8. Шарыгин М. Д. Экономическая география и регионалистика: учебное пособие. — Пермь : НОУ ВПО «Западно-Уральский институт экономики и права», 2010. — 339 с.
9. Зырянов А. И. Регион: пространственные отношения природы и общества. — Пермь : Пермский государственный университет, 2006. — 372 с.
10. Федоров В. Н. Генезис факторов пространственной дифференциации инфраструктуры региона // Трешниковские чтения - 2025. Современная географическая картина мира и технологии географического образования. — Ульяновск : Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова, 2025. — С. 164–166.
11. Федоров В. Н. Новая концепция инфраструктуры в экономико-географических исследованиях // Трешниковские чтения - 2025. Современная географическая картина мира и технологии географического образования. — Ульяновск : Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова, 2025. — С. 160–163.
12. Анохин А. А., Кузин В. Ю. Трансформация современной методологии и трендов исследования поляризации // Известия РГО. — 2021. — № 5. — С. 3–20.

13. Нефедова Т. Г., Трейвиш А. И., Шелудков А. В. Полимасштабный подход к выявлению пространственного неравенства в России как стимула и тормоза развития // Известия РАН. Серия географическая. — 2022. — № 3. — С. 289–309.
14. Чешев А. С., Шумейко М. В. Геосистемная парадигма регионального социо-эколого-экономического развития // Экономика и экология территориальных образований. — 2023. — № 7(3). — С. 28–35.
15. Василевский Л. И. Территориальная дифференциация и географизированная статистика // Известия АН. Серия географическая. — 1994. — № 2. — С. 119–127.
16. Черкашин А. К. Естественная классификация географических систем: модели представления знаний // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». — 2020. — Т. 31. — С. 102–122.
17. Анимица П. Е., Новикова Н. В., Ходус В. В. Типология как метод исследования социально-экономического развития регионов // Известия Уральского государственного экономического университета. — 2009. — Т. 23, № 1. — С. 52–59.
18. Булочников П. А. К вопросу о типологизации субъектов Российской Федерации // Петербургский экономический журнал. — 2020. — № 4. — С. 82–89.

Сведения об авторах:

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

E-mail: fedorovw_nik@mail.ru

ORCID iD  0009-0000-3420-1204

Web of Science ResearcherID  NGS-1636-2025

Original article
 PACS 93.30.-w
 OCIS 000.2700
 MSC 86A04

Geosystemic approach in regional studies of infrastructure of the Volga Federal District

V. N. Fedorov 

Ulyanovsk State Pedagogical University, 432071, Ulyanovsk, Russia

Submitted July 27, 2025
 Resubmitted July 29, 2025
 Published September 30, 2025

Abstract. For regional infrastructure studies, a geosystem approach is proposed based on methods that make it possible to assess the state and level of development of meso-level infrastructure, identify the diversity of connections between its components, and determine the degree of its spatial differentiation. Clustering, typology, and zoning methods are used, designed not only to generalize and systematize the data obtained, but also to help solve the problem of disproportions in infrastructure development. Based on the “soft” principles of classification and typological grouping, the author identifies infrastructure areas within the Volga Federal District that have their own characteristics, which are due to both the specifics of the socio-economic development of the regions and differences in the territorial localization of infrastructure facilities.

Keywords: geosystem, region, infrastructure, spatial development, cluster, typology, zoning, Volga Federal District

References

1. Sochava V. B. Introduction to the doctrine of geosystems. — Novosibirsk : Science, 1978. — 320 p.
2. Baklanov P. Ya. The geosystems approach in geographical research // Pacific geography. — 2020. — no. 1. — P. 7–12.
3. Gladkiy Yu. N. Systemic and geosystemic methods in geography: issues of effective use // Society. Environment. Development. — 2018. — no. 4. — P. 72–79.
4. Sharygin M. D., Stolbov V. A. Theoretical and methodological aspects of the search for laws and regularities in human geography // Geographical bulletin. — 2020. — no. 1 (52). — P. 22–32.
5. Trofimov A. M., Chistobaev A. I., Sharygin M. D. Theory of spatial organization. Communication I. Geographic space-time and the structure of geoformations // Izvestiya RGO. — 1993. — Vol. 125, no. 2. — P. 10–19.
6. Kovalev Yu. Yu. Evolution of a systems approach in geospatial studies // Izvestiya RAS. Geographical series. — 2021. — Vol. 85, no. 5. — P. 773–784.

7. Protasov A. A. The continuity-discreteness concept in hydrobiology and ecology: from the river continuum to the biosphere // Historical and biological research. — 2022. — Vol. 14, no. 1. — P. 11–26.
8. Sharygin M. D. Economic geography and regional studies: a textbook. — Perm : West Ural institute of economics and law, 2010. — 339 p.
9. Zyryanov A. I. Region: spatial relationships of nature and society. — Perm : Perm state university, 2006. — 372 p.
10. Fedorov V. N. Genesis of factors of spatial differentiation of regional infrastructure // Treshnikov readings - 2025. The modern geographical picture of the world and technologies of geographical education. — Ulyanovsk : Ulyanovsk state pedagogical university, 2025. — P. 164–166.
11. Fedorov V. N. A new concept of infrastructure in economic-geographical research // Treshnikov readings - 2025. The modern geographical picture of the world and technologies of geographical education. — Ulyanovsk : Ulyanovsk state pedagogical university, 2025. — P. 160–163.
12. Anokhin A. A., Kuzin V. Yu. Transformation of modern methodology and trends in polarization research // Izvestia RGO. — 2021. — no. 5. — P. 3–20.
13. Nefedova T. G., Treyvish A. I., Sheludkov A. V. A multiscale approach to identifying spatial inequality in Russia as a stimulus and inhibitor to development // Izvestia RAS. Geographical Series. — 2022. — no. 3. — P. 289–309.
14. Cheshev A. S., Shumeiko M. V. Geosystem paradigm of regional socio-ecological-economic development // Economics and ecology of territorial entities. — 2023. — no. 7(3). — P. 28–35.
15. Vasilevsky L. I. Territorial differentiation and geographic statistics // News of the academy of sciences. Geographical series. — 1994. — no. 2. — P. 119–127.
16. Cherkashin A. K. Natural classification of geographical systems: knowledge representation models // Izvestiya of Irkutsk state university. Earth sciences series. — 2020. — Vol. 31. — P. 102–122.
17. Animitsa P. E., Novikova N. V., Khodus V. V. Typology as a method for studying the socioeconomic development of regions // Izvestiya of the Ural state university of economics. — 2009. — Vol. 23, no. 1. — P. 52–59.
18. Bulochnikov P. A. On the typology of constituent entities of the Russian Federation // St. Petersburg economic journal. — 2020. — no. 4. — P. 82–89.

Information about authors:

Fedorov Vladimir Nikolaevich — 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, Russia.

E-mail: fedorovw_nik@mail.ru

ORCID iD  0009-0000-3420-1204

Web of Science ResearcherID  NGS-1636-2025

Авторский указатель

Акимова, А. С., 1
Алтунин, К. К., 45
Карасева, П. П., 14

Селюкова, А. Д., 25
Синдяев, А. В., 65
Федоров, В. Н., 78

Author's index

Akimova, A. S., 1
Altunin, K. K., 45

Fedorov, V. N., 78

Karaseva, P. P., 14

Selukovaa, A. D., 25
Sindyaev, A. V., 65

