ISSN 2712-8326



НАУКА ONLINE
SCIENCE ONLINE

Сетевое издание
№ 2 (35)| 2026

http://nauka-online.ru/

НАУКА ONLINE, № 2 (35), 2026.

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

ISSN 2712-8326

Выходит 4 раза в год.

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

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

Главный редактор: К. К. Алтунин.

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

Официальный сайт: `http://nauka-online.ru/`

E-mail: nauka_online@ulspu.ru

Science online, issue 2 (35), 2026.

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

ISSN 2712-8326

Published 4 times a year.

Founder: Ulyanovsk State Pedagogical University.

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

Publisher: Ulyanovsk State Pedagogical University.

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

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

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

Official site: `http://nauka-online.ru/`

E-mail: nauka_online@ulspu.ru

Редакционная коллегия

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

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

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

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

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

Идиатуллов 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

Физические науки 1

Теоретическая физика 1

1 Исследование физических свойств мезоскопических систем на основе нанокристаллической керамики
К. К. Алтунин, З. А. Толянина

Науки об образовании 59

Теория и методика обучения и воспитания 59

59 Педагогическое проектирование учебного модуля по современным моделям осциллирующей Вселенной для подготовки будущих учителей физики
Н. В. Криворотова

71 Педагогическое проектирование дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов в системе управления обучением MOODLE
Е. С. Павлова

92 Педагогическое проектирование дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями в системе управления обучением MOODLE
А. А. Родионова

109 Педагогическое проектирование дистанционного курса нанооптики нанопористых структур в системе управления обучением MOODLE
Е. С. Павлова

124 Методика преподавания космологической инфляции в модифицированных теориях гравитации в курсе физике
М. А. Чернеев

Авторский указатель 145

CONTENTS

Physical sciences **1**

Theoretical physics 1

1 Investigation of physical properties of mesoscopic systems based on nanocrystalline ceramics
K. K. Altunin, Z. A. Tolyanina

Educational sciences **59**

Theory and methodology of training and education 59

59 Pedagogical design of a training module on modern models of the oscillating Universe for the training of future physics teachers
N. V. Krivorotova

71 Pedagogical design of a distance learning course on quantum optics of nanostructures from quantum metamaterials in the learning management system MOODLE
E. S. Pavlova

92 Pedagogical design of a distance learning course on nanooptics of nanocomposites with nanoinclusions in the learning management system MOODLE
A. A. Rodionova

109 Pedagogical design of a distance learning course on nanooptics of nanoporous structures in the learning management system MOODLE
A. D. Selyukova

124 Methods of teaching cosmological inflation in modified theories of gravity in a physics course
M. A. Cherneev

Author's index 146

Секция 1

Физические науки

1.1 Теоретическая физика

Научная статья
УДК 537.9
ББК 22.313
ГРНТИ 29.19.09
ВАК 1.3.3.
PACS 65.40.-b
OCIS 160.4236
MSC 78A25

Исследование физических свойств мезоскопических систем на основе нанокристаллической керамики

К. К. Алтунин, З. А. Толянина [1]

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

Поступила в редакцию 10 мая 2026 года
После переработки 12 мая 2026 года
Опубликована 30 июня 2026 года

Аннотация. Рассмотрены физические свойства мезоскопических систем на основе нанокристаллической керамики. Разработана теоретическая модель термоэлектрических процессов в мезоскопических системах на основе нанокристаллической керамики. Разработана компьютерная программа для описания термоэлектрических процессов в мезоскопических системах на основе нанокристаллической керамики. Проведены численные расчёты термоэлектрической добротности мезоскопических систем на основе нанокристаллической керамики.

Ключевые слова: нанокристаллическая керамика, мезоскопическая система, термоэлектрическая добротность, теоретическая модель термоэлектрических процессов, нанокристаллит

[1] E-mail: ms.zinaida.tolyanina@yandex.ru

Введение

В работе рассматриваются основные физические свойства мезоскопических систем. Мезоскопические системы на основе нанокристаллической керамики представляют значительный интерес для современной материаловедения и физики конденсированного состояния. Уникальные свойства таких систем возникают на стыке объёмных и наноразмерных эффектов, когда характерный размер структурных элементов (нанокристаллитов) становится сопоставимым с длинами свободного пробега носителей заряда, длиной волны фононов или длиной когерентности. Это приводит к модификации спектра электронных и фононных состояний, изменению механизмов рассеяния и, как следствие, к существенной трансформации термоэлектрических, термомагнитных и термооптических характеристик материала. Теоретическое описание подобных систем требует учёта дискретного спектра в нанокристаллитах, туннелирования через границы зёрен, а также вклада межфазных границ и дефектов в процессы переноса. Численное моделирование позволяет не только проверить адекватность аналитических моделей, но и исследовать системы со сложной геометрией и распределением дефектов, что затруднительно для чисто аналитических подходов.

Целью исследования является описание физических свойств мезоскопических систем.

В соответствии с целью исследования поставлены следующие задачи:

1. проанализировать литературу по физике мезоскопических систем,
2. разработать теоретическую модель физических процессов и явлений в мезоскопических системах на основе нанокристаллической керамики,
3. провести численные расчёты набора физических характеристик мезоскопических систем на основе нанокристаллической керамики.

Используя математическую модель физических процессов в мезоскопических системах необходимо рассчитать набор эффективных характеристик с помощью компьютерных методов.

Объектом исследованием является мезоскопическая система. Предметом исследованием являются совокупность физических процессов в мезоскопических системах на основе нанокристаллической керамики.

Гипотеза исследования заключается в том, что процесс прогнозирования физических свойств мезоскопических систем на основе нанокристаллической керамики будет возможен при условии построения теоретической модели физических процессов в мезоскопических системах и проведении численных расчётов физических характеристик мезоскопических систем на основе нанокристаллической керамики.

В качестве методов исследования выбраны теоретические, численные и компьютерные методы физики мезоскопических систем. В качестве материалов исследования выбраны мезоскопические материалы.

Теоретическая значимость исследования заключается в том, что результаты численных расчётов могут помочь в развитии новой теории физических свойств мезоскопических систем.

Практическая значимость исследования заключается в том, что теоретические и численные результаты могут быть использованы в курсе теоретической физики. Результаты анализа термоэлектрических, термомагнитных и термооптических явлений в мезоскопических системах могут быть использованы для проектирования новых материалов с улучшенными характеристиками для применения в термоэлектрических генераторах, магнитных датчиках и оптических модуляторах. Мезоскопические системы на основе нанокристаллической керамики представляют собой перспективное направление

материаловедения, где уникальное сочетание структурных, механических и функциональных свойств открывает возможности для решения актуальных задач в различных высокотехнологичных областях. Практическая значимость этих исследований обусловлена прежде всего тем, что нанокристаллическая керамика демонстрирует принципиально иные характеристики по сравнению с традиционными поликристаллическими материалами. Малые размеры зёрен (обычно от 1 до 100 нм) приводят к значительному увеличению доли границ зёрен и тройных стыков, что существенно влияет на диффузионные процессы, прочностные свойства и электрофизические параметры. Например, высокая плотность границ зёрен облегчает массоперенос и фазовые превращения, что позволяет создавать материалы с управляемыми кинетическими свойствами, а также снижать температуры спекания, что критически важно для энергоэффективных технологий производства нанокристаллической керамики. Особое внимание в последние годы уделяется мезоскопическим системам, где нанокристаллическая керамика сочетается с функциональными добавками или формирует композитные структуры. Такие системы находят применение в энергетике, в частности, в создании высокоэффективных электролитов для твердотельных батарей и топливных элементов.

Обзор литературы

Обзор современных научных исследований физических свойств мезоскопических систем отражает интенсивное развитие этого междисциплинарного направления на стыке конденсированного состояния вещества, нанофизики и квантовой теории транспорта. Мезоскопические системы, характеризующиеся размерами, сопоставимыми с длиной когерентности и фазовой релаксации (от нескольких нанометров до микрон), демонстрируют уникальные явления, где квантовые эффекты проявляются макроскопически, но остаются чувствительными к деталям микроструктуры и внешних воздействий. В последние годы мезоскопические системы, размеры которых находятся в промежуточном диапазоне между микроструктурами и наноструктурами (от нескольких нанометров до микрон), привлекают пристальное внимание исследователей благодаря уникальному сочетанию квантовых и классических свойств. Современные работы в области физики мезоскопических систем демонстрируют, что именно в этом масштабе проявляются фундаментальные эффекты, которые невозможно объяснить в рамках ни чисто макроскопических, ни чисто наноскопических моделей. Одним из ключевых направлений остаётся исследование квантового хаоса и флуктуаций проводимости, где экспериментальные данные часто подтверждают теоретические предсказания о переходе между универсальными классами симметрии в теории случайных матриц.

Мезоскопические системы и структуры на основе нанокристаллической керамики представляют собой уникальный класс материалов, свойства которых определяются промежуточным (мезоскопическим) масштабом — обычно от 10 до 100 нм. На этом уровне классические законы сплошных сред пересекаются с квантово-размерными эффектами, что кардинально меняет механические, электронные и термические свойства дефектных и межгранульных границ [1]. Современные керамические материалы и устройства требуют повышения надёжности и устойчивости к повреждениям. Помимо прочных связей, существуют примеры, демонстрирующие превосходные механические свойства наноструктурированной керамики, такие как устойчивые к повреждениям керамические аэрогели, способные выдерживать высокие деформации без растрескивания, и локальная пластичность в плотной нанокристаллической керамике. В статье [1] рассмотрены последние достижения. В статье [1] обсуждаются три темы: высокоэластичные нановолоконные керамические аэрогели, несущая нагрузку нанокерамика с улучшенными механическими свойствами и использование инструментария моделирования с помощью машинного обучения для понимания взаимосвязи между структурой,

механизмами деформации и свойствами микроструктуры.

Присущая керамическим материалам хрупкость представляет собой существенное препятствие для их широкого практического применения [2, 3]. Прочная химическая связь, включающая ионные и ковалентные связи, а также жёстко упорядоченная кристаллическая структура, лишенная механизма скольжения, обуславливают характерную высокую твёрдость и хрупкость керамики. Следовательно, эти материалы подвержены разрушению под воздействием внешних ударов или напряжений. Для преодоления этой проблемы исследователи постоянно изучают новые конструкции наноструктур и методы получения материалов, направленные на создание устойчивой к повреждениям керамики, улучшение её механических свойств и расширение области применения [4, 5]. Кроме того, постоянно развивающиеся технологии машинного обучения и моделирования открывают новые перспективы для исследований нанокерамики.

За последние два десятилетия нанокерамика стала новой категорией конструкционных керамических материалов, отличающихся от традиционной керамики. Нанокерамика, характеризующаяся наноразмерными включениями и структурами, включая размер зёрен, множество фаз и дефекты размером менее 100 нм, демонстрирует значительные улучшения механических свойств, термостойкости и обрабатываемости. Благодаря непрерывному развитию передовых технологий синтеза и характеризации керамики, нанокерамика постепенно заняла решающую роль в различных областях, таких как конструкционные детали, электроника и энергетика [6, 7].

В статье [8] представлен обзор механизмов уплотнения оксидных нанопорошков. В статье [8] показано, что на мезоуровне ключевую роль играют кооперативная перегруппировка наночастиц, зернограничная диффузия и пластическая деформация. В статье [8] рассмотрены передовые методы (искровое плазменное спекание, микроволновое спекание), которые позволяют достичь полной плотности тела, подавляя нежелательный рост зёрен за счёт высокой скорости нагрева. Зависимость свойств от размера и масштаб их изменения делают всю область наноматериалов невероятно захватывающей; тот факт, что такие изменения свойств могут быть достигнуты с помощью очень малых долей наноматериалов, также способствует этому. Однако в случае с керамическими материалами ситуация иная. Изменение стабильности керамических фаз на наномасштабе и сложность высокотемпературных процессов обработки керамики — две ключевые причины, по которым нанокерамический сектор не всегда может давать ожидаемые результаты. Неожиданная фаза, микроструктура или локальные колебания состава — все это может сделать керамическую систему гетерогенной на наномасштабе. Важной задачей, однако, остаётся выявление этих гетерогенностей, их понимание (причины их возникновения) и их использование (по возможности) в интересах.

В статье [9] представлены многочисленные примеры исследований факторов, влияющих на наномасштабные гетерогенности в керамике. В статье [9] подчёркивается роль сырья, его синтеза и технологических факторов, а также возможности и ограничения традиционных аналитических инструментов при изучении подобных сложных явлений. Обсуждается влияние этих неоднородностей на отдельные свойства (например, как барьер или преимущество). Примеры исследований наноразмерных неоднородностей представлены в непредвзятой форме, чтобы проиллюстрировать их влияние в обоих направлениях (например, как барьер или преимущество). Поскольку неоднородности в нанокерамике ранее не изучались методически (в отличие от полимеров или металлов), статья [9] призвана послужить основой для начала подобных исследований.

Локализация деформации в полосах сдвига широко наблюдается перед интенсивным повреждением и разрушением в пластичных или зернистых материалах. Однако механизмы образования полос сдвига, как правило, неизвестны. В статье [10] показано, что нанокристаллические керамические наностолбики из ZrN разрушаются в результате

образования полос сдвига под действием сжатия. В статье [10] эволюция микроструктуры всего процесса образования полос сдвига отслеживалась с помощью электронной микроскопии и дифракции. В статье [10] показано, что наностолбики деформируются посредством ряда зернистых процессов, обусловленных прерывистым зарождением и распространением дислокаций. Падение напряжения, связанное с дислокационными процессами, относительно невелико, поскольку дислокационные лавины ограничены в нанокристаллической керамике из-за влияния размера нанозёрен. В областях образования полос сдвига обнаружены локализованные и кооперативные зернистые процессы, а также нанотрещины. В статье [10] предложена модель образования полос сдвига и нанотрещин. Таким образом, полученные в статье [10] результаты впервые демонстрируют пространственную и временную природу прерывистой гранулярной активности, приводящей к образованию полос сдвига в нанокристаллической керамике.

Сегрегация легирующих примесей, электрический заряд которых отличается от заряда исходных ионов, и образование слоя пространственного заряда индуцируют локальное электрическое поле в области границ зёрен. В зависимости от валентности и локального электростатического потенциала, носители заряда, контролирующие диффузионную ползучесть, могут либо накапливаться, либо истощаться в этом слое пространственного заряда, и скорость ползучести соответственно увеличивается или уменьшается. Недавно была разработана модель для изучения влияния локального электрического поля, индуцированного сегрегацией, на диффузионную ползучесть нанокристаллической керамики со сферическими зернами. Однако для получения аналитических решений в существующем анализе предполагалось, что размер зерна значительно превышает ширину слоя пространственного заряда. Это предположение может стать неприемлемым для нанокристаллических материалов по мере уменьшения размера зерна; поэтому в статье [11] используется численный метод для решения существующих уравнений без этого предположения. На примере тетрагонального диоксида циркония оксида иттрия показано, что разница между существующими приближенными аналитическими решениями и полученными численными результатами является существенной, когда размер зерна составляет менее 50 нм.

В статье [12] представлены результаты исследования поведения дефектов в наноматериалах на основе диоксида циркония: нанопорошках диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия, полученных методом прессования, с различным содержанием Y_2O_3, и керамике, полученной путем спекания нанопорошков диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия. Кроме того, были исследованы монокристаллы диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия. В качестве основных инструментов в статье [12] использовались методы аннигиляции позитронов, включая измерение времени жизни позитронов и доплеровского уширения совпадений с использованием обычного источника позитронов, а также эксперименты по доплеровскому уширению на моноэнергетическом пучке позитронов. В статье [12] эти методы были дополнены наблюдениями с помощью просвечивающей электронной микроскопии и рентгеновской дифракции. В статье [12] для лучшего подтверждения интерпретации экспериментальных данных были выполнены современные теоретические расчёты параметров позитронов для идеальной решётки ZrO_2 и выбранных конфигураций дефектов в диоксиде циркония, стабилизированном оксидом иттрия. В статье [12] показано, что ни кислородные вакансии, ни их нейтральные комплексы с замещающими атомами иттрия не способны захватывать позитроны. С другой стороны, вакансии циркония представляют собой глубокие ловушки для позитронов и, очевидно, ответственны за насыщенный захват позитронов, наблюдаемый в монокристаллах диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия.

В статье [13] предложена модель, описывающая образование наноразмерных трещин

в деформированных нанокристаллических металлах и керамике. В рамках модели трещины образуются в суперпозиции полей напряжений межфазных краевых дислокаций и дисклинационных диполей, образующихся на границах раздела (зёрен и межфазных границах) при пластической деформации нанокристаллических металлов и керамики. В статье [13] теоретически показано, что образование трещин при таких дислокационно-дисклинационных конфигурациях энергетически выгодно в нанокристаллическом никеле и нанокерамике на основе карбида кремния и оксида алюминия в широких диапазонах их структурных параметров.

В плотной керамике $BaTiO_3$ с уменьшением размера зёрен от 1200 нм до 50 нм наблюдалось прогрессивное снижение тетрагональной деформации, теплоты перехода, температуры Кюри и относительной диэлектрической постоянной. Корреляции между размером зёрен, степенью тетрагональной деформации и сегнетоэлектрическими свойствами убедительно подтверждают существование внутреннего размерного эффекта. В статье [14] на основе экспериментальных данных критический размер для исчезновения сегнетоэлектричества был оценён в $10 - 30$ нм. В статье [14] показано, что сильное снижение относительной диэлектрической проницаемости, наблюдаемое для нанокристаллической керамики, можно объяснить сочетанием внутреннего размерного эффекта и зависящего от размера эффекта «разбавления» «мёртвого» слоя на границе зёрен.

Теоретические модели для малых сегнетоэлектрических частиц предсказывают постепенное снижение температуры Кюри, спонтанной деформации решётки и поляризации до достижения критического размера, соответствующего переходу в кубическую фазу и исчезновению сегнетоэлектричества [15]. В отличие от этого, поведение нанокристаллической керамики на основе титаната бария с размером зерна примерно 30 нм определяется внешними эффектами, связанными с границами зёрен, которые маскируют ожидаемое уменьшение свойств. Хотя некубическая кристаллическая структура, высокая диэлектрическая постоянная (около 1600) и изменение диэлектрической проницаемости с температурой указывают на сегнетоэлектрическое поведение, наблюдаются очень тонкие и почти линейные петли гистерезиса поляризации. В статье [15] доказательства существования сегнетоэлектрической доменной структуры с доменами, простирающимися на несколько зёрен, и переключения поляризации в локальном масштабе получены с помощью пьезоотликовой силовой микроскопии. В статье [15] подавление макроскопического ферроэлектрического гистерезиса и переключения обусловлено замороженной доменной структурой, стабильной под воздействием внешнего поля благодаря эффектам, оказываемым границами зерен, таким как зажим доменных стенок и препятствие переключению поляризации. Кроме того, поле деполяризации, создаваемое низкодиэлектрическими неферроэлектрическими границами зёрен, может вызвать значительное снижение поляризации. Если размер зёрен достаточно мал, ожидается, что керамика претерпит «фазовый переход» в полярную фазу с непереключаемой поляризацией. Керамика на основе титаната бария с размером зёрен 30 нм, исследованная в работе [15], считается близкой к этому переходу.

В статье [16] показано, что недавнее наблюдение обратной зависимости Холла-Петча в нанокристаллической керамике открывает возможный путь к повышению пластичности традиционной хрупкой керамики за счёт наноразмерного эффекта, подобно нанокристаллическим металлам и сплавам. Однако основные механизмы деформации нанокристаллической керамики до сих пор недостаточно изучены. В статье [16] объединяется моделирование реактивной молекулярной динамики и экспериментальная просвечивающая электронная микроскопия для определения механизмов деформации на атомном уровне нанокристаллического карбида бора.

Несмотря на многочисленные экспериментальные и имитационные исследования, существование перехода Холла-Петча в обратный переход Холла-Петча в нанокристал-

лической керамике остаётся неясным. Используя моделирование методом молекулярной динамики, в статье [17] однозначно выявили переход от упрочнения к разупрочнению при сдвиговой деформации нанокристаллической керамики из карбида кремния в зависимости от размера зерна. В статье [17] результаты показывают чётко выраженный максимум прочности на сдвиг для размеров зерен в диапазоне от 6.2 до 7.7 нм. Дальнейшее уменьшение размера зерна приводит к снижению прочности, что согласуется с обратным поведением Холла-Петча. По мере уменьшения размера зерна увеличение областей границ зерен приводит к гомогенизации сдвиговых напряжений по всей микроструктуре, что позволяет снизить локальные уровни сдвиговых напряжений при более высоких макроскопически приложенных напряжениях. Это задерживает локализацию сдвига в областях границ зёрен, предотвращая кавитацию, нанотрещины и преждевременное разрушение, и является причиной наблюдаемого поведения Холла-Петча. Напротив, при размерах зёрен < 6.2 нм относительно податливый характер структурно неупорядоченных областей границы зёрен определяет механический отклик, снижая прочность на сдвиг и вызывая переход к обратному поведению Холла-Петча. Композитная модель, описывающая переход между поведением Холла-Петча и обратным поведением Холла-Петча, успешно описывает механическое поведение нанокристаллического карбида кремния в зависимости от размера зёрен [17].

В статье [18] была отмечена возможность влияния локальных электрических полей, вызванных сегрегацией, на объёмную диффузию частиц, контролирующих пластическую деформацию нанокристаллических материалов. До настоящего времени существовала только модель, применимая к случаю одномерной системы. Несмотря на свою простоту, она предсказывает значительное влияние локального электрического поля на ползучесть. В статье [18] разработана другая модель, применимая к трехмерным системам. Она исходит из диффузионной модели и может быть обобщена на те системы, в которых модель скольжения по границам зерен, учитывающая диффузионные процессы, точно описывает пластичность в субмикронном диапазоне размеров зёрен. В статье [18] обсуждается диапазон применимости, а также различное поведение нанокристаллических материалов по сравнению с субмикронными. В статье [18] показано, что предварительные результаты хорошо согласуются с опубликованными данными для нанокристаллической керамики на основе тетрагонального диоксида циркония иттрия.

В статье [19] предложен и теоретически описан новый физический механизм или режим пластической деформации в нанокристаллических металлах и керамике. Этот режим представляет собой процесс кооперативного скольжения по границам зёрен и миграции границ зерен, обусловленной напряжением. В статье [19] теоретически показано, что новый режим деформации энергетически более выгоден, чем «чистое» скольжение по границам зёрен, и повышает пластичность нанокристаллических твёрдых тел в широком диапазоне их структурных параметров.

Растущий интерес к наноструктурированной керамике и её применению подчеркивает необходимость понимания процесса горячего прессования наноразмерных порошков AlN. В статье [20] используется моделирование методом молекулярной динамики для исследования процесса горячего прессования нанокерамики AlN и выяснения лежащих в его основе механизмов спекания.

В статье [21] сообщается о влиянии размера зёрен на ионную проводимость образцов диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия, синтезированных методом шарового измельчения. Измерения комплексного импеданса в зависимости от температуры и частоты проводились на нанокристаллических образцах диоксида циркония, стабилизированного 10 мол. % оксида иттрия, с размерами зёрен от 900 до 17 нм. Объёмная ионная проводимость резко снижается при размерах зёрен менее 100 нм, хотя её

энергия активации практически не зависит от размера зёрен. В статье [21] результаты интерпретируются как результат образования слоя пространственного заряда, возникающего в результате сегрегации подвижных кислородных вакансий в ядро границы зерна. Толщина этого слоя пространственного заряда, образующегося на границах зёрен, составляет порядка 1 нм для крупных зерен микронного размера, но увеличивается до 7 нм при уменьшении размера зерна до 17 нм. Это приводит к истощению кислородных вакансий на большой объёмной доле зерна и, следовательно, к значительному снижению проводимости оксид-ионов.

Примеси, сегрегированные на границах зёрен материала, существенно изменяют его поведение при разрушении. Ярким примером является охрупчивание никеля, вызванное сегрегацией серы, где наблюдаемая связь между аморфизацией границ зёрен, вызванной серой, и охрупчиванием остаётся необъясненной. В статье [22] моделирование методом молекулярной динамики с использованием реактивного силового поля с $48 \cdot 10^6$ атомами даёт недостающее звено. А именно, снижение прочности на сдвиг границ зёрен на порядок вследствие аморфизации в сочетании со снижением прочности на растяжение позволяет вершине трещины всегда находить лёгкий путь распространения.

Компьютерное моделирование методами молекулярной динамики аморфного кремния с использованием потенциала Стиллингера-Вебера выявляет существование двух различных атомных сред: одной твердоподобной и другой жидкоподобной [23]. Механическое поведение аморфного кремния при пластической деформации до больших деформаций может быть полностью описано массовой долей ϕ жидкоподобного материала в нём [23]. В частности, образцы с более высоким значением ϕ более склонны к пластическому течению, что указывает на то, что жидкоподобные атомные среды действуют как «носители» пластичности в аморфном кремнии. При деформации под внешним постоянным давлением все образцы аморфного кремния сходятся к уникальному значению ϕ, характерному для стационарного течения [23].

В статье [24] в целях разработки и проектирования высокомощных целевых материалов следующего поколения для исследований в области физики элементарных частиц исследуется возможность изготовления нетканых металлических или керамических нановолокон методом электропрядения. В статье [24] для собственного производства различных керамических нановолокон создана недорогая установка электропрядения. Нановолокна из стабилизированного иттрием диоксида циркония успешно получены методом электропрядения смеси карбоната циркония с раствором высокомолекулярного поливинилпирролидона. Некоторые из присущих процессу электропрядения недостатков, таких как толщина нановолоконного мата и низкая скорость производства, преодолеваются путём модификации определённых частей системы электропрядения и их расположения для получения более толстых нановолоконных матов миллиметрового порядка с большей скоростью. Получены непрерывные длинные нановолокна диаметром около ста нанометров, которые затем подвергаются термической обработке для удаления полимера и кристаллизации диоксида циркония. Образцы были подготовлены таким образом, чтобы соответствовать определённым минимальным физическим свойствам, таким как толщина, структурная целостность, термическая стабильность и гибкость. В статье [24] для оценки механических свойств отдельных нановолокон была использована простая инновационная методика, основанная на атомно-силовой микроскопии, которая оказалась сопоставимой с объемным диоксидом циркония. Нановолокна были протестированы на высокотемпературную стойкость с использованием электронного пучка. Они показали устойчивость к радиационному повреждению при облучении ионами Kr^{2++} с энергией 1 МэВ. Некоторые нановолокна диоксида циркония также были протестированы под воздействием высокоинтенсивного импульсного протонного пучка и сохранили свою структурную целостность. В статье [24] показано, что

керамические нановолокна были протестированы под воздействием различных пучков и условий облучения для подтверждения их физических свойств для практического использования в качестве мишеней ускорителей. В статье [24] обсуждаются преимущества и проблемы таких нановолокон в качестве потенциальных будущих мишеней по сравнению с мишенями из объёмных материалов.

Анализ исследований физических свойств мезоскопических систем показывает, что это направление остаётся одним из самых динамично развивающихся в современной физике конденсированного состояния. Ключевые тенденции развития включают изучение топологических фаз, спиновых эффектов, квантового транспорта и взаимодействия с внешними полями. Современные экспериментальные и теоретические работы демонстрируют, что мезоскопические системы могут служить платформой для реализации принципиально новых устройств в области квантовых вычислений, спинтроники, оптоэлектроники и термоэлектрики. Особое внимание уделяется роли квантовых флуктуаций, топологических инвариантов и мезоскопической локализации, которые определяют уникальные свойства таких систем. Современная наука о мезоскопической нанокерамике перешла от простого синтеза к дизайну границ раздела. Ключевой тенденцией является использование методов быстрого спекания и контролируемой нанокристаллизации из стекол для сохранения мезоразмерной структуры. Это позволяет создавать конструкционные материалы и функциональные среды для суперконденсаторов. Будущие исследования, вероятно, будут сосредоточены на интеграции мезоскопических структур в функциональные устройства, а также на изучении неравновесных и динамических процессов в этих системах. Мезоскопические системы продолжают оставаться источником инноваций и фундаментальных открытий, объединяя традиционные подходы физики твёрдого тела с современными методами нанотехнологий. Таким образом, современные исследования мезоскопических систем показывают, что именно в этом масштабе проявляются уникальные квантовые эффекты, топологические фазы и нелинейные взаимодействия, которые могут быть использованы для разработки принципиально новых устройств в области квантовых вычислений, спинтроники, оптоэлектроники и биоинженерии. Будущие работы, вероятно, будут сосредоточены на интеграции мезоскопических структур в функциональные системы и изучении их динамических свойств в неравновесных условиях.

Нанокристаллическая керамика является классом перспективных керамических материалов, характеризующихся размерами зёрен в нанометровом диапазоне, обычно менее 100 нм [25, 26]. Эти материалы привлекли огромное научное и технологическое внимание, поскольку, когда размер зёрен уменьшается до наномасштаба, большая объёмная доля атомов находится на границах зерен — в керамике с размером зёрен 5 нм почти половина атомов связана с границами зерен [26]. Эта фундаментальная структурная характеристика обуславливает уникальные механические, физические и химические свойства, которые отличаются от свойств их обычных микрокристаллических аналогов. Концепция нанокристаллических материалов была впервые предложена Гербертом Глейтером в середине 1980-х годов, который использовал физическое осаждение из паровой фазы для синтеза металлических нанофазных материалов [26]. Вскоре после этого подход был распространен на керамику путём компактирования и спекания окисленных металлических нанокристаллов, что ознаменовало начало эры нанокристаллической керамики [26].

Производство нанокристаллической керамики начинается с синтеза наноразмерных порошков. Для этой цели разработано множество химических и физических методов [27]. Химическое осаждение — широко используемый подход, который предлагает преимущество получения относительно больших объёмов порошка (до 50 г в день в лабораторных условиях). В этом методе наночастицы образуются путём осаждения из раство-

ра с последующим прокаливанием. Например, порошки ZrO_2-3 мол. % Y_2O_3 можно синтезировать путём осаждения гидроксидов циркония и иттрия из хлоридных солей [26]. Ключевой проблемой в жидкостном химическом синтезе является агломерация порошков, которая может препятствовать достижению размеров нанокристаллических зёрен в спеченном продукте. Стратегии, такие как промывка осажденных частиц этанолом для замены поверхностных гидроксильных групп, оказались эффективными в минимизации образования агломератов [26]. Парофазные методы, включая методы газофазной конденсации и парофазных реакций, важны для коммерческого производства как оксидных, так и неоксидных нанокристаллических порошков. Эти методы позволяют получать высокочистые порошки с контролируемым распределением размеров частиц [27]. Механохимический синтез включает высокоэнергетическое измельчение исходных материалов. Теория механики разрушения предполагает, что наименьшие фрагменты, достижимые при многократном высокоэнергетическом измельчении, находятся в диапазоне 5˘100 нм, хотя этот метод часто приводит к образованию более крупных частиц, содержащих ультрамелкие зерна [27]. Золь-гель-процесс — один из самых популярных жидкофазных методов получения нанокомпозитных керамических порошков. Он позволяет получать сложные формы непосредственно из гелевого состояния с контролируемым химическим составом и пониженными температурами обработки [27]. Методы с использованием полимерных прекурсоров включают нанесение прекерамических полимеров (например, поликарбосилана) на модифицированные керамические порошки, с последующим пиролизом и спеканием. Этот метод успешно применялся для получения нанокомпозитов Al_2O_3/SiC, получая частицы SiC размером менее 20 нм с более однородным распределением, чем при традиционном смешивании [27]. Аналогичным образом, нанокомпозитные порошки Si_3N_4/SiC были синтезированы из полиметилсилазановых прекурсоров [27].

Уплотнение нанокристаллических порошков представляет собой значительную проблему из-за чрезвычайно большой площади поверхности наночастиц и их склонности к агломерации. Однако большая площадь поверхности также обеспечивает термодинамическую движущую силу, которую можно использовать для низкотемпературного спекания [27]. Беспрессовое спекание нанокристаллического ZrO_2-3 мол. % Y_2O_3 при 1050°C в течение 5 часов позволяет получить 100 % плотную керамику с размером зерен 85 нм при условии эффективного устранения агломерации в процессе синтеза порошка [26]. Температура спекания нанокристаллической керамики может быть снижена примерно на 400°C по сравнению с коммерческими порошками, как это было продемонстрировано для диоксида титана [26].

Двухступенчатое спекание — это относительно новый метод, который обеспечивает полное уплотнение при минимизации роста зёрен за счёт исследования кинетического окна между диффузией по границам зёрен и миграцией по границам зёрен. Для стабилизированного иттрием диоксида циркония этот подход позволил получить высокоплотную керамику с нанометрической микроструктурой [27]. Спекание под высоким давлением (например, 1.5 ГПа) позволяет уплотнять при температурах значительно ниже начала быстрого роста зёрен. Чжан и др. [8] продемонстрировали, что нанокристаллический 3YSZ (3 мол. % Y_2O_3-стабилизированного ZrO_2) может быть полностью уплотнен при 900°C под давлением 1.5 ГПа без какого-либо роста зерен, достигая твёрдости по Виккерсу 1414.5 HV. Прямые микроструктурные наблюдения показали, что происходит пластическая деформация, включая высокотемпературный предел текучести (генерация дислокаций на границах зёрен) и скольжение по границам зерен играли доминирующую роль в уплотнении, обеспечивая приблизительно 93.9 % конечной плотности [28].

Спекание и ковка, приложение одноосного сжимающего напряжения во время спека-

ния, было продемонстрировано как эффективный метод для смягчения последствий агломерации [26]. Для нанокристаллического диоксида титана спекание-ковка при 60 МПа позволило достичь плотности 91 % с размером зёрен 87 нм за счёт преимущественного закрытия крупных межагломератных пор посредством сверхпластичного скольжения по границам зёрен [26].

Спекание под высоким давлением и высокой температурой было особенно успешным для керамики из карбида вольфрама (WC) без связующего вещества. Лю и др. [29] изготовили почти полностью плотную нанополикристаллическую керамику из карбида вольфрама (относительная плотность 99.2 %) со средним размером зерна 103 нм при 6 ГПа и 1400°C, достигнув твердости по Виккерсу при комнатной температуре 29.7 ГПа [29].

Нанокристаллическая керамика имеет широкий спектр фактических и потенциальных применений [26, 27, 29]: топливные элементы и датчики кислорода: Повышенная ионная проводимость (улучшение на порядок) в нанокристаллическом ZrO_2-3 мол. % Y_2O_3 за счёт ускоренной диффузии по границам зёрен при более низких рабочих температурах [26].

Нанокристаллическая керамика (размер зерна 80 нм) демонстрирует скорости деформации в 34 раза выше, чем у коммерческих материалов с размером зерна 0.3 мкм; что приближает сверхпластическую формовку керамики к практическим скоростям формовки металлов [26].

Нанополикристаллическая керамика WC без связующего с сохранением твёрдости до 1000°C перспективна для высокоскоростной обработки, инструментов и компонентов тепловых двигателей [29].

Малое и узкое распределение размеров пор ($5 - 20$ нм) в нанокристаллической керамике обеспечивает высокоселективную фильтрацию [26].

Нанокристаллическая керамика может служить в качестве промежуточных слоёв для диффузионной сварки керамических деталей при пониженных температурах и давлениях, используя их высокую диффузионную способность и сверхпластичный поток [26]. В статье [30] исследуются высокопрочные, износостойкие керамико-графеновые нанокомпозиты для применения в медицинских имплантатах.

Наноструктурная керамика не ограничивается конструкционными применениями. Разрабатываются инновационные технологии на основе нанокристаллов для электронных керамических устройств с новыми, гигантскими электронными функциями [31]. Икемото [31] предложил изготовление диэлектрических устройств релаксорного типа с использованием собранных нанокубов $BaTiO_3$ и $SrTiO_3$. Свободностоящий плотный керамический лист, состоящий из нанокубов $BaTiO_3$ (средний размер 57 нм), демонстрирует диэлектрическое поведение, подобное релаксационному, с диффузным фазовым переходом и зависящей от частоты диэлектрической постоянной, что объясняется образованием полярных нанообластей [31]. Это представляет собой перспективный путь к созданию бессвинцовых релаксационных сегнетоэлектриков для применения в конденсаторах. Аналогично, были предложены устройства с положительным температурным коэффициентом сопротивления на основе полупроводниковых листов нанокубов $BaTiO_3$, с потенциальными областями применения в качестве восстанавливаемых устройств защиты цепей в батареях, медицине и аэрокосмической отрасли [31]. Ключевые проблемы при создании таких устройств включают: синтез монодисперсных перовскитных нанокубов ($BaTiO_3$ и $SrTiO_3$) с правильной кубической формой и узким распределением размеров; достижение кристаллографического контакта между нанокубами для хорошего электронного соединения; и создание специфических электронных функциональных наноструктур, потенциально посредством локального управления деформацией [31].

Механическое поведение нанокристаллической керамики определяется соотношением Холла–Петча, которое предсказывает увеличение предела текучести и твердости с уменьшением размера зерна:

$$H_v = H_0 + kd^{-1/2}\,, \tag{1}$$

где H_0 – собственная твёрдость, k – удельный коэффициент упрочнения материала, и d – средний размер зерна [27]. Это соотношение основано на принципе, что границы зёрен препятствуют движению дислокаций, и меньшие зерна ограничивают размер скоплений дислокаций, требуя более высокого приложенного напряжения для распространения деформации через зерна [27].

В керамических наноструктурных композитах включение ультрадисперсных частиц второй фазы дополнительно улучшает механические свойства за счёт меньшения роста зёрен матрицы посредством эффекта закрепления Зенера. Напряжение закрепления, создаваемое частицами на границах зёрен, определяется формулой: $\sigma_z = 3f\gamma/4r$, где f – объёмная доля, а r – радиус частиц второй фазы [27]. Это микроструктурное измельчение приводит к уменьшению размера дефектов, что положительно влияет на прочность и надежность, как описано уравнением Гриффита [27]. Однако дальнейшее уменьшение размера зёрен ниже критического порога может привести к обратному эффекту Холла-Петча, при котором твёрдость уменьшается с уменьшением размера зёрен. Это явление широко изучалось в нанокристаллических металлах и объясняется переходом от пластичности, опосредованной дислокациями (для более крупных зёрен), к скольжению по границам зёрен (для очень мелких зёрен) [25]. В керамике это поведение менее хорошо изучено из-за сложности изготовления высококачественной плотной наноструктурированной керамики, хотя недавние работы по магниево-алюминиевой шпинели показали, что соотношение Холла-Петча соблюдалось до размеров зёрен 28 нм [27].

Низкая вязкость разрушения в керамических наноструктурных композитах остаётся существенным ограничением для нанокристаллической керамики в различных конструкционных приложениях. Однако в этих материалах действуют несколько механизмов упрочнения [30]. Традиционные микромеханизмы упрочнения, действующие в микрокристаллической керамике, также работают в нанокристаллической керамике [30]: упрочнение волокнами, приводящее к перекрытию трещин волокнами, которые сбрасывают нагрузку с вершины трещины, ломаются или отслаиваются и вытягиваются, рассеивая упругую энергию; упрочнение пластичной фазой, приводящее к включению пластичных (металлических) включений, которые притупляют вершины трещин и обеспечивают перекрытие; упрочнение за счёт фазового превращения, приводящее к тетрагонально-моноклинному фазовому превращению включений ZrO_2 вблизи вершин трещин, которое создаёт сжимающие напряжения, противодействующие движущей силе распространения трещины; упрочнение микротрещинами, приводящее к образованию многочисленных микротрещин вблизи растущих больших трещин, рассеивающих упругую энергию. Существуют специфические микромеханизмы упрочнения, уникальные для нанокристаллической керамики, связанные с пластической деформацией на наномасштабе, опосредованной границами зёрен [30]: скольжение и вращение границ зёрен, миграция границ зерен, обусловленная напряжением, совместные процессы скольжения и миграции границ зёрен, режимы вращательной деформации на наномасштабе, ползучесть Кобла (ползучесть, контролируемая диффузией по границам зёрен). Совместный процесс скольжения и миграции границ зёрен особенно эффективен. Теоретические оценки для нанокристаллического 3C-SiC с размером зерна 15 нм предсказывают, что этот механизм может увеличить трещиностойкость в $1.63 - 3.65$ раза в зависимости от геометрии границ зёрен и пути распространения трещины [30].

Упрочнение на основе графена представляет собой значительный недавний прогресс. Керамико-графеновые нанокомпозиты — например, Si_3N_4 с 1.5 об. % графеновых листов

— демонстрируют значительное увеличение трещиностойкости (увеличение примерно на 235 % с $\approx$ 2.8 до $\approx$ 6.6 МПа·м$^{1/2}$) за счёт отклонения трещин, перекрытия трещин графеновыми листами, их вырывания и образования шейки [30]. Графеновые включения обладают сверхпрочностью, большой шириной и длиной и обычно располагаются на границах зёрен, где они также препятствуют росту зёрен во время спекания [30].

В статье [29] было показано, что нанокристаллическая керамика может демонстрировать исключительные высокотемпературные механические свойства термомеханическая стабильность. Лю и др. [29] продемонстрировали, что нанополикристаллическая керамика WC без связующего вещества сохраняет твердость по Виккерсу 23.4 ГПа при 1000°C — всего на 22 % ниже, чем её значение при комнатной температуре. Эта выдающаяся термомеханическая стабильность превосходит стабильность типичной технической керамики, такой как SiC, Si_3N_4 и Al_2O_3, и значительно превосходит стабильность сплавов WC-Co, которые теряют более 50 % своей твёрдости при 900°C [29].

Механизмы, лежащие в основе этой высокотемпературной стабильности, включают: относительно низкий коэффициент теплового расширения WC ($4.0 \cdot 10^{-6}$ 1/K) [29], высокую долю (16.5 %) границ зерен Σ_2-кручения, которые представляют собой низкоэнергетические, высококогерентные интерфейсы, препятствующие скольжению границ зёрен при высоких температурах [32], плотные дислокационные клубки, сохраняющиеся даже после отжига при 1000°C [32]. Ползучесть также сильно зависит от размера зерна. Скорость ползучести Кобла масштабируется как d^{-3}, что означает, что уменьшение размера зерна с 10 мкм до 10 нм теоретически может увеличить скорость ползучести на девять порядков величины, что предполагает возможность деформации при комнатной температуре [27]. Хотя это ещё не было убедительно продемонстрировано в полностью плотной нанокристаллической керамике, добавление наночастиц второй фазы (например, SiC в Al_2O_3) может увеличить сопротивление ползучести на один-два порядка за счёт закрепления границ зёрен и генерации остаточных сжимающих напряжений на границах раздела [27].

Деформационное поведение нанокристаллической керамики принципиально отличается от поведения крупнозернистой керамики из-за взаимодействия между кристаллическими зернами и аморфными фазами границ зёрен [25]. Используя многомиллионноатомные молекулярно-динамические модели наноиндентирования в нанокристаллическом SiC (размер зерна порядка 8 нм), Шлуфарска и др. [25] выявили переход в механическом отклике при критической глубине индентирования. Этот переход проявляется как переход от межзеренной непрерывной деформации (режимы 1 и 2): кооперативное скольжение зёрен и связь через аморфный «цемент» границ зёрен, в котором преобладает кристаллизация на краях границ зёрен. Внутризеренной дискретной деформации (режимы 3 и 4): раздельное движение зёрен, скольжение дислокаций внутри зёрен и аморфизация. Переход возникает в результате взаимодействия между кооперативным скольжением зёрен, вращением зёрен и образованием межзеренных дислокаций — поведение, аналогичное явлениям «залипания – скольжения». При малой глубине вдавливания аморфные границы зёрен удерживают зерна вместе, позволяя осуществлять непрерывную деформацию. После пластической деформации границ зёрен происходит их разделение, что приводит к дискретным пластическим процессам, таким как скольжение дислокаций внутри зёрен [25]. В статье [25] показало, что аморфная фаза границ зёрен в нанокристаллическом SiC претерпевает структурную эволюцию во время деформации, с переходом от деформации, в которой преобладает кристаллизация (упорядочение на краях границ зёрен) на ранних стадиях, к деформации, в которой преобладает разупорядочение (аморфизация) на более поздних стадиях. Эта конкуренция между упорядочением и разупорядочением имеет решающее значение для понимания механического отклика нанокерамики [25].

Для металлических нанокристаллических материалов (которые помогают нам понять поведение керамики) механизмы деформации зависят от размера зерен [33]: зерна < 10 нм: преобладают механизмы, опосредованные границы зёрен, включая вращение зёрен и скольжение границ зёрен. В нанокристаллическом никеле исследование с помощью туннельного сканирующего микроскопа выявило группы соседних зёрен, изменяющих ориентацию во время деформации, образуя агломераты зёрен. Для зёрен $10-50$ нм показано, что частичная эмиссия дислокаций с границ зёрен становится основным механизмом, приводящим к деформационному двойникованию даже в металлах с высокой энергией дефектов упаковки (например, Al), которые не двойникуются в крупнозернистой форме. Для зёрен $50-100$ нм показано, что преобладает полное скольжение дислокаций решётки, при этом дислокации испускаются и поглощаются на границах зёрен без накопления внутри зёрен.

Поверхность листов различных металлических материалов была сильно деформирована методом проволочной щетки при комнатной температуре для получения нанокристаллического поверхностного слоя. В статье [34] поверхностные слои металлических материалов, образовавшиеся в результате сильной пластической деформации вблизи поверхности, были охарактеризованы с помощью туннельного электронного микроскопа. В статье [34] было установлено, что обработка проволочной щеткой является эффективным способом интенсивной пластической деформации вблизи поверхности, и нанокристаллизация поверхности легко достигается в большинстве металлических материалов.

Нанокристаллическая керамика представляет собой захватывающий класс материалов, где преобладание границ зёрен над объёмом кристалла приводит к свойствам, недостижимым в обычной керамике. Уникальные механизмы деформации, включая скольжение по границам зёрен, вращение зёрен, частичную эмиссию дислокаций с границ зёрен и кооперативную миграцию по границам зёрен, позволяют этим материалам сочетать высокую прочность с потенциалом повышения трещиностойкости и даже сверхпластичности при умеренных температурах. Достижения в порошковом синтезе, особенно в жидкостно-химических методах и методах с использованием полимерных прекурсоров, наряду с новыми методами спекания, такими как спекание под высоким давлением, двухступенчатое спекание и искровое плазменное спекание, делают плотную нанокристаллическую керамику всё более доступной. Дальнейшее развитие керамико-графеновых нанокомпозитов и электронных устройств на основе нанокристаллов обещает ещё больше расширить технологическое влияние этих замечательных материалов.

Недавнее экспериментальное наблюдение обратной зависимости Холла-Петча в нанокристаллической керамике открывает возможный путь к повышению пластичности традиционной хрупкой керамики за счёт наноразмерного эффекта, подобно нанокристаллическим металлам и сплавам. Однако основные механизмы деформации нанокристаллической керамики до сих пор недостаточно изучены. В работе [16] объединяется моделирование реактивной молекулярной динамики и экспериментальная просвечивающая электронная микроскопия для определения механизмов деформации на атомном уровне нанокристаллического карбида бора. В работе [16] провели крупномасштабное (до ≈ 3700000 атомов) моделирование реактивной молекулярной динамики для конечной сдвиговой деформации трех моделей границ зёрен с размерами зёрен от 4.84 нм (135050 атомов) до 14.64 нм (3702861 атом). В работе [16] обнаружили обратную зависимость Холла-Петча в нанокристаллическом карбиде бора, в которой механизм деформации определяется скольжением по границам зёрен. Скольжение по границам зёрен приводит к образованию аморфных полос в предварительно искажённых икосаэдрических областях границ зёрен с инициированием кавитации внутри аморфных полос. В работе [16] результаты моделирования подтверждаются экспериментальными наблюдениями межзеренной аморфной фазы на границах зёрен, возникающей в результате

скольжения границ зёрен. В работе [16] показано, что теоретические и экспериментальные результаты дают атомистическое объяснение влияния границ зёрен на деформационное поведение нанокристаллической керамики, объясняя обратное соотношение Холла-Петча.

Несмотря на многочисленные экспериментальные и имитационные исследования, существование перехода Холла-Петча в обратный переход Холла-Петча в нанокристаллической керамике остается неясным. Используя моделирование методом молекулярной динамики, в статье [17] однозначно выявили переход от упрочнения к разупрочнению при сдвиговой деформации нанокристаллической керамики из карбида кремния в зависимости от размера зерна. В статье [17] результаты показывают чётко выраженный максимум прочности на сдвиг для размеров зёрен в диапазоне от 6.2 до 7.7 нм. Дальнейшее уменьшение размера зерна приводит к снижению прочности, что согласуется с обратным поведением Холла-Петча. По мере уменьшения размера зерна увеличение областей границ зёрен приводит к гомогенизации сдвиговых напряжений по всей микроструктуре, что позволяет снизить локальные уровни сдвиговых напряжений при более высоких макроскопически приложенных напряжениях. Это задерживает локализацию сдвига в областях границ зёрен, предотвращая кавитацию, нанотрещины и преждевременное разрушение, и является причиной наблюдаемого поведения Холла-Петча. Напротив, при размерах зёрен < 6.2 нм относительно податливый характер структурно неупорядоченных областей границ зёрен определяет механический отклик, снижая прочность на сдвиг и вызывая переход к обратному поведению Холла-Петча. Композитная модель, описывающая переход между поведением Холла-Петча и обратным поведением Холла-Петча, успешно описывает механическое поведение нанокристаллического карбида кремния в зависимости от размера зёрен.

В статье [35] показано, что по мере уменьшения размера зерен до нанометрового диапазона характеристики сегнетоэлектрической нанокерамики в конечном итоге определяются конкуренцией двух эффектов: внутреннего эффекта, связанного с локальными свойствами границы зёрен, и внешнего эффекта, возникающего из динамики доменной структуры, на которую сильно влияет поле деполяризации, создаваемое границей зерен. В статье [35] исследуется такая ??конкуренция с помощью фазово-полевого моделирования, основанного на зависящем от времени кинетическом уравнении Гинзбурга–Ландау. Исследование проводится на поляризованной и неполяризованной нанокерамике в условиях высокоамплитудного и низкоамплитудного биполярного переменного электрического поля с выбранным размером зёрен и частотой нагрузки. В статье [35] расчёты для поляризованного $BaTi?O_3$ при 100 Гц показывают, что для размера зерен от 170 до 50 нм его свойства определяются в основном внешним эффектом, а от 50 до 10 нм — внутренним эффектом. По мере уменьшения размера зёрен диэлектрические и пьезоэлектрические постоянные в остаточном состоянии непрерывно возрастают в области, где преобладают внешние факторы, а затем резко падают в области, где преобладают внутренние факторы. В статье [35] частотные расчёты в диапазоне от 10 до 2500 Гц при размере зёрен 100 нм показывают, что высокочастотное поведение очень похоже на поведение в области с малым размером зёрен, где преобладают внутренние факторы, тогда как низкочастотное поведение тесно связано с поведением в области с крупными зернами, где преобладают внешние факторы, причем граница раздела находится около 400 Гц. Для неполяризованной керамики при малосигнальной нагрузке внутренний эффект доминирует во всём диапазоне размеров зёрен и частот.

В статье [21] сообщается о влиянии геометрических размеров зёрен на ионную проводимость образцов диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия, синтезированных методом шарового измельчения. В статье [21] измерения комплексного импеданса в зависимости от температуры и циклической частоты проводились на нанокристал-

лических образцах диоксида циркония, стабилизированного 10 мол.% оксида иттрия, с размерами зёрен от 900 до 17 нм. Объёмная ионная проводимость резко снижается при размерах зёрен менее 100 нм, хотя её энергия активации практически не зависит от размера зёрен. В статье [21] результаты интерпретируются как результат образования слоя пространственного заряда, возникающего в результате сегрегации подвижных кислородных вакансий в ядро границы зерна. Толщина этого слоя пространственного заряда, образующегося на границах зёрен, составляет порядка 1 нм для крупных зёрен микронного размера, но увеличивается до 7 нм при уменьшении размера зерна до 17 нм. Это приводит к истощению кислородных вакансий на большой объемной доле зерна и, следовательно, к значительному снижению проводимости оксид-ионов.

В статье [36] показано, что основные физические свойства поликристаллических сегнетоэлектриков, включая электрокалорический эффект, в значительной степени зависят от размера зерен в материалах. Используя фазово-полевую модель, основанную на зависящем от времени уравнении Гинзбурга-Ландау, исследованы некоторые электрокалорические свойства сегнетоэлектрической керамики с различными размерами зёрен. В статье [36] рассчитаны петли гистерезиса сегнетоэлектрика при различных температурах, а адиабатические изменения температуры получены косвенным методом, основанным на соотношении Максвелла. Среди исследованных моделей с различными размерами зёрен, модель с большим размером зёрен обладает большим значением адиабатического изменения температуры, а также более высокой температурой, при которой наблюдается максимальное адиабатическое изменение температуры. Напротив, для модели с меньшим размером зерен значение адиабатического изменения температуры уменьшается, а температура, соответствующая максимальному адиабатическому изменению температуры, смещается в сторону более низких температур. Значительное влияние размеров зёрен на электрокалорический эффект поликристаллических сегнетоэлектриков обусловлено различными типами доменных структур, образующихся внутри зёрен. По сравнению с вихревыми доменами, образующимися в модели с меньшим размером зерен, 90°-домены и одиночные домены, наблюдаемые в модели с большим размером зёрен, способствуют более выраженному изменению температурно-зависимой поляризации, что приводит к большему электрокалорическому эффекту. Кроме того, смещение соответствующей температуры в сторону более низких значений при меньшем размере зёрен обусловлено уменьшением температуры перехода, вызванным эффектом размера. Работа [36] предполагает определенную степень свободы для понимания свойств электрокалорического эффекта поликристаллических сегнетоэлектриков, зависящих от размера зёрен, с точки зрения доменной структуры и её эволюции при изменении температуры, что может быть дополнительно изучено для улучшения характеристик твердотельных охлаждающих устройств.

В статье [37] были получены нанокристаллические стеклокерамические материалы с помощью метода порошкового спекания с использованием золы в качестве сырья. В статье [37] было установлено, что углерод в золе-уносе препятствует уплотнению в процессе спекания. Однако после обработки декарбонизацией степень уплотнения спеченного образца значительно улучшилась. В статье [37] было исследовано влияние размера частиц, показавшее, что активность спекания значительно повышается после уменьшения размера частиц с помощью высокоэнергетического шарового измельчения. Кроме того, в статье [37] показано, что уменьшение размера частиц способствует кристаллизации золы-уноса с низкой основностью. Благодаря механизму поверхностной кристаллизации, полученные стеклокерамические материалы в основном состояли из наноразмерных фаз анортита и муллита. В статье [37] были изучены эффекты температуры и времени спекания на механические свойства. В статье [37] показано, что увеличение времени или температуры спекания способствовало повышению степени уплотнения.

Влияние геометрического размера вдавливания и механизмы деформации в нанокристаллической керамике на основе оксида иттрия остаются в значительной степени неизученными. В статье [38] систематически исследуется зависимость эффекта размера вдавливания от размера зерна и механизм пластической деформации нанокристаллической керамики на основе оксида иттрия с размерами зёрен от 18 нм до 10 мкм. Зависимость твёрдости от размера зерна демонстрирует обратное поведение Холла-Петча при критическом размере зерна ≈ 35 нм и ниже, а также перегиб в области активационного объёма. Для нанокристаллической керамики на основе оксида иттрия в классической области Холла-Петча эффект размера вдавливания может быть описан геометрически необходимыми дислокациями на основе модели Никса-Гао, тогда как в обратной области Холла-Петча эффект размера вдавливания может быть отнесён к геометрически необходимым кластерам сдвиговых превращений. Дальнейший анализ с помощью просвечивающей электронной микроскопии и численный анализ подтверждают выводы о том, что необычный эффект размера вдавливания может быть связан с уникальными механизмами деформации, включая скольжение по границам зёрен, вращение зёрен и миграцию границ зёрен. Более того, было обнаружено, что вызванное деформацией вращение зёрен и миграция границ зерен приводят к росту зерен в нанокристаллической керамике на основе оксида иттрия. Работа [38] проливает свет на уникальные механические свойства керамики с чрезвычайно малыми размерами зёрен.

Использование отходов процесса обогащения руды Баян-Обо, содержащих редкоземельные элементы, в качестве сырья для получения нанокристаллической стеклокерамики методом микроволнового нагрева является перспективным подходом для устойчивого развития ресурсов и низкоуглеродного производства. В статье [39] исследовано влияние кондуктивного, инфракрасного, микроволнового и плазменного нагрева на процесс зарождения кристаллов с целью получения доказательств термического и нетермического микроволнового эффекта. Проанализированы различия в механических свойствах, свойствах высокотемпературного размягчения и микроструктуре стеклокерамики, полученной традиционным и микроволновым нагревом. В статье [39] результаты показали, что микроволновый нагрев имеет более высокую скорость нагрева, чем традиционный. Объемный нагрев снижает зависимость теплопроводности внутри образца, формируя однородную термодинамическую систему для зарождения кристаллов. Полимерный характер кремний-кислородной сетки может быть уменьшен микроволновым излучением для стимулирования зарождения кристаллов, и после непрерывного процесса зарождения-кристаллизации образуются тонкие нанокристаллы с шаровидными кристаллами и однородной микроструктурой. В отличие от традиционной термической обработки, прочность образцов на изгиб увеличилась со 169 МПа до 219.9 МПа под воздействием микроволнового излучения, а также улучшилась термическая стабильность. В статье [39] показано, что превосходные механические свойства объясняются увеличением частоты колебаний растяжения Si-O и силы связи.

В статье [40] предложена новая стратегия для создания большого количества межфазных когерентностей в нанокристаллических многофазных композитах. В статье [40] продемонстрирован путь, включающий аморфизацию, кристаллизацию и реакцию, на примере композитов WC-Co. Подробно изучены характеристики зарождения кристаллов, кристаллографии роста и фазовых превращений на атомном уровне для керамических зёрен. В статье [40] раскрыты механизмы формирования специфической межфазной когерентности в полученных нанокристаллических керамико-металлических композитах. Благодаря межфазной когерентности обеспечивается непрерывность локальной деформации от металлической к керамической фазе, что приводит к равномерному распределению деформации вместо концентрации напряжений на границах раздела. В статье [40] представленный нанокристаллический композит обладает выдающимися

механическими свойствами, одновременно демонстрируя высокую твёрдость и трещиностойкость.

Дислокации представляют собой линейные дефекты в кристаллических твёрдых телах и служат основными носителями пластической деформации. Хотя дислокации наиболее широко известны в металлических материалах, ранние исследования их механики в ионных кристаллах, таких как LiF [41], значительно продвинули фундаментальное понимание этого дефекта материала. В последние годы возобновление исследований дислокаций в керамике было вдохновлено технологическим потенциалом, который несут такие одномерные линейные дефекты, а именно «дислокационной технологией» [42–44], для функциональной керамики следующего поколения. Например, дислокации, взаимодействующие с ферроэлектрическими доменными стенками, могут быть использованы для модификации пьезоэлектрических свойств ферроэлектрических материалов [44, 45]. В статье [43] предложили новые рекомендации по проектированию керамических устройств с высокой плотностью нанопроволок или периодически ориентированных нанопроволок в монокристаллах путем контроля распределения, типа и состава дислокаций. В статье [43] в качестве модельных систем были использованы диэлектрический сапфир и монокристалл YSZ, в которых высокая плотность дислокаций и периодически ориентированные дислокации были введены путём высокотемпературных испытаний на сжатие и изготовления бикристаллов с малоугловыми границами зёрен. В статье [43] были измерены электронная и ионная проводимость для кристаллов с введёнными дислокациями, и был сделан вывод, что предложенные методы очень полезны для придания новых функций любому монокристаллу. Потенциал дислокаций (линейных дефектов) в керамике, возможно, до недавнего времени был сильно недооценен. В статье [44] были продемонстрированы многообещающие концептуальные доказательства возможности регулирования функциональных и механических свойств с помощью дислокаций, что открыло новое направление исследований дислокаций в керамике для широкого спектра потенциальных применений. Однако общеизвестно, что керамика тверда (трудно деформируется) и хрупка (легко разрушается), особенно при комнатной температуре. Механическое регулирование дислокаций в керамике остается серьёзной проблемой. Для решения этой насущной проблемы в статье [44] рассматривается механическое проектирование дислокаций в керамике на основе анализа трех фундаментальных факторов: зарождения, размножения и движения дислокаций. В статье [44] демонстрируются успешные экспериментальные подходы к регулированию плотности дислокаций и размера пластической зоны на монокристалле титаната стронция. Обсуждается конкуренция между пластической деформацией и образованием трещин, обусловленная дислокациями. В статье [44] освещаются аспекты взаимодействия внешних полей для управления дислокациями, что может стать ключом к модулированию заряженных ядер дислокаций в керамике и открыть новые пути для механического управления дислокациями при комнатной температуре. Обсуждаются некоторые открытые вопросы и проблемы, связанные с инженерией дислокаций в керамике. Аналогично, в электрокерамике повышенная электропроводность после пластической деформации объясняется заряженными характеристиками дислокаций в ионных кристаллах [46]. Кроме того, в пластически деформируемых полупроводниках взаимодействие между дислокациями и фотовозбуждёнными носителями заряда позволяет регулировать ширину запрещенной зоны материала посредством деформации [47, 48]. В последнее время локализованный магнитный порядок наблюдался вокруг дислокаций в керамике $SrTiO_3$ [49]. Эти результаты подчеркивают сложное взаимодействие между механикой и функциональностью керамики, демонстрируя потенциал инженерии дислокаций для создания передовых керамических материалов с улучшенными функциональными свойствами [44]. Эти новые направления исследований предполагают, что

роль дислокаций в керамике, возможно, была сильно недооценена. В целом, керамика считается хрупким материалом с ограниченной пластичностью, что делает её склонной к стохастическим и катастрофическим разрушениям.

Сверхтвёрдые материалы с твёрдостью по Виккерсу, обычно превышающей 40 ГПа, в настоящее время ограничены несколькими материалами, такими как алмаз и кубический нитрид бора [50, 51]. Из них кубический нитрид бора является представительной сверхтвёрдой керамикой с твёрдостью по Виккерсу 33–45 ГПа [52, 53]. Синтезированный кубический нитрид бора в условиях высокого давления и высокой температуры [54] показал высокую твёрдость 85 ГПа и высокую трещиностойкость 10.5 МПа·м$^{1/2}$. Более того, когда наноструктура кубического нитрида бора была представлена преимущественно наноразмерными (≈ 3.8 нм) двойниковыми доменами [55], твёрдость достигала 95-108 ГПа, что даже выше, чем у синтетического алмаза (твёрдость около 100 ГПа) [56], с высокой трещиностойкостью 12.7 МПа·м$^{1/2}$. Эти исключительные свойства сверхтвёрдой керамики привели к широкому промышленному применению в резке, шлифовании и сверлении. Следуя этой траектории, были проведены различные исследования по поиску других сверхтвёрдых материалов, и в последнее время внимание привлекают твёрдые керамические материалы, такие как карбид бора и кубический карбид кремния, среди различных полиморфов карбида кремния. Коммерческий карбид бора [57] и SiC [58, 59] имеют твёрдость 25-30 ГПа и 20-27 ГПа соответственно, что делает их недостаточными для превышения порога сверхтвердости (> 40 ГПа). Однако сообщалось, что карбид бора [60] и кубический карбид кремния [61] в виде тонких плёнок имеют твердость более 50 ГПа, что позволяет им достигать сверхтвёрдого состояния. Поликристаллические керамические материалы, такие как карбид бора и кубический карбид кремния, обладают значительной применимостью благодаря своим отличительным структурным свойствам. Теоретическая плотность ромбоэдрического карбида бора и кубического карбида кремния составляет 2.52 г/см^3 [62] и 3.21 г/см^3 [63] соответственно, что делает их намного легче большинства металлов и сплавов. Их превосходные свойства, такие как высокая твёрдость, высокая прочность, износостойкость и химическая стабильность, имеют важное значение в инженерных приложениях, таких как бронежилеты, ядерные абсорбенты, шлифовальные и полировальные материалы [62, 64]. Даже при наличии этих привлекательных свойств поликристаллическая керамика с крупнозернистой микроструктурой ограничена своей присущей ей склонностью к разрушению из-за хрупкости, которая характеризуется низкой вязкостью разрушения, возникающей из-за транскристаллического (также называемого «внутрикристаллическим») режима разрушения и жёсткой ковалентной связи [65–71].

Обзор современных исследований в области нанокристаллической керамики демонстрирует значительный прогресс в понимании взаимосвязи между её структурными особенностями на наноуровне и физическими свойствами, а также в развитии методов синтеза, позволяющих получать материалы с заданными характеристиками. Одним из ключевых выводов является то, что уменьшение размера зерен до нанометрового диапазона приводит к принципиальным изменениям в механических, термодинамических и функциональных свойствах керамики, обусловленным эффектами границ зёрен, высокой плотностью дефектов и неравновесной термодинамикой. Так, например, нанокристаллические материалы часто проявляют необычайно высокую прочность на изгиб и вязкость разрушения, что связано с подавлением распространения трещин за счёт механизма Холла-Петча на наноуровне, однако при дальнейшем уменьшении размера зёрен может наблюдаться инверсия этого эффекта из-за доминирования деформационных механизмов, связанных с границами зёрен. Это требует контроля над морфологией и микроструктурой при синтезе.

Синтетические подходы к получению нанокерамики можно условно разделить на

два основных класса: методы, основанные на химическом синтезе нанопорошков с последующим спеканием, и прямые методы формирования нанокристаллической структуры. Химические методы, такие как соосаждение, микроэмульсионный синтез, позволяют получать высокодисперсные порошки с однородным химическим составом и контролируемой морфологией, однако они часто сталкиваются с проблемами агрегации частиц и трудностями в достижении высокой плотности при последующем спекании из-за высокой удельной поверхности и связанной с ней поверхностной энергии. Альтернативные подходы, такие как искровое плазменное спекание или микроволновое спекание, позволяют минимизировать рост зёрен за счёт быстрого нагрева и создания неравновесных условий, что способствует получению материалов с сохранением нанокристаллической структуры и высокой плотностью. Однако эффективность этих методов сильно зависит от выбора режимов обработки и природы исходного порошка. Особое внимание уделяется роли легирования и модификации границ зёрен для стабилизации нанокристаллической структуры и улучшения её функциональных свойств. Например, введение посторонних ионов или наночастиц второго фазы может снижать поверхностную энергию границ зёрен, замедляя их миграцию при высоких температурах, а также вносить дополнительные функциональные возможности, такие как каталитическая активность или магнитные свойства. При этом наблюдается тенденция к интеграции физических методов модификации, таких как ионная имплантация или лазерное легирование, с традиционными подходами синтеза для создания гибридных структур с заданными физическими свойствами. Важным аспектом остаётся и проблема масштабируемости технологий. Хотя лабораторные образцы нанокерамики часто демонстрируют выдающиеся характеристики, их промышленное производство сталкивается с вызовами, связанными с однородностью и воспроизводимостью свойств, а также экономической целесообразностью. Развитие нанокристаллической керамики тесно связано с прогрессом в области физического материаловедения, термодинамики неравновесных систем и нанотехнологий.

Эффект Зеебека в мезоскопических системах на основе нанокристаллической керамики

Эффект Зеебека в мезоскопических системах на основе нанокристаллической керамики обусловлен возникновением градиента термоэлектродвижущей силы при наличии градиента температуры, что приводит к появлению электрического тока в замкнутой электрической цепи. В мезоскопических системах, где размер зёрен L сопоставим с длиной когерентности электронов L_ϕ, наблюдается модификация термоэлектрических свойств из-за квантования уровней в ограниченных объёмах, асимметрии плотности состояний и аномального рассеяния носителей заряда на границах зёрен. В отличие от массивных материалов, где эффект Зеебека определяется в основном объёмными свойствами, в мезоскопических системах на основе нанокристаллической керамики вклад границ зёрен, квантовых размерных эффектов и флуктуаций плотности состояний становится доминирующим.

Мезоскопические системы на основе различной нанокристаллической керамики представляют собой уникальные объекты, где проявляются как квантовые эффекты, так и классические граничные явления. Рассмотрим нанокристаллическую керамику с характерным размером зёрен L, сопоставимым с длиной когерентности L_ϕ. Когда размер зёрен L становится сопоставимым с длиной когерентности электронов L_ϕ, возникают квантовые размерные эффекты, в то время как высокая плотность границ зёрен приводит к существенному рассеянию носителей заряда и фононов. В мезоскопических системах плотность состояний $g\left(E\right)$ модифицируется из-за квантования уровней в ограниченных объёмах и взаимодействия электронов с фононными и магнонными возбуж-

дениями на границах зёрен. Термоэлектрические свойства различных мезоскопических систем определяются взаимосвязью между потоками электрического заряда и тепла. В рамках линейного отклика плотности электрического тока $\mathbf{j}$ и потока тепла $\mathbf{Q}$ связаны с градиентами электрохимического потенциала $\nabla\mu$ и температуры ∇T через систему феноменологических уравнений:

$$\mathbf{j} = \sigma\mathbf{E} - \sigma S\nabla T \,, \tag{2}$$

$$\mathbf{Q} = \Pi\mathbf{j} - \kappa\nabla T \,, \tag{3}$$

где σ – тензор электропроводности, S – тензор термо-ЭДС (коэффициент Зеебека), $\Pi = TS$ – коэффициент Пельтье (в силу соотношения Онсагера), κ – тензор теплопроводности, $\mathbf{E} = -\nabla\phi - \frac{1}{e}\nabla\mu$ – эффективное электрическое поле. В изотропном приближении тензоры сводятся к скалярам. Электропроводность нанокристаллической керамики сильно зависит от рассеяния носителей на границах зёрен. Используя модель Майсснера для сферических зёрен диаметром d, эффективную проводимость можно записать как:

$$\sigma_{\text{eff}} = \sigma_0 \left(1 + \frac{\ell}{d}\right)^{-1} \,, \tag{4}$$

где σ_0 – проводимость монокристаллического материала, ℓ – длина свободного пробега в объёме зерна. Термо-ЭДС в условиях сильного рассеяния на границах описывается модифицированной формулой Мотта:

$$S\left(T\right) = \frac{\pi^2 k_B^2 T}{3e} \left[\frac{1}{g\left(E\right)}\frac{dg\left(E\right)}{dE} + \frac{1}{\mu\left(E\right)}\frac{d\mu\left(E\right)}{dE}\right]_{E=E_F} \,, \tag{5}$$

где k_B – постоянная Больцмана, e – заряд электрона, $g\left(E\right)$ – плотность состояний, $\mu\left(E\right)$ – энергетическая зависимость подвижности, E_F – энергия Ферми.

Энергетическая зависимость подвижности $\mu\left(E\right)$ также испытывает колебания из-за рассеяния на граничных дефектах и интерференционных эффектов в мезоскопических структурах (например, в кольцах или волокнах). Для нанокристаллической керамики с учетом размерного квантования и рассеяния границах зёрен выражение для коэффициента Зеебека (уравнение (5)) модифицируется следующим образом:

$$S\left(T\right) = \frac{\pi^2 k_B^2 T}{3e} \left[\frac{1}{g_{\text{eff}}\left(E\right)}\frac{dg_{\text{eff}}(E)}{dE} + \frac{1}{\mu_{\text{eff}}\left(E\right)}\frac{d\mu_{\text{eff}}(E)}{dE}\right]_{E=E_F} \,, \tag{6}$$

где $g_{\text{eff}}\left(E\right)$ и $\mu_{\text{eff}}\left(E\right)$ – эффективные плотность состояний и подвижность, учитывающие влияние границ зёрен. В случае наноточек или мезоскопических колец плотность состояний можно представить с учётом квантования уровней следующим образом:

$$g_{\text{eff}}\left(E\right) = \sum_n \delta\left(E - E_n\right) + g_{\text{bulk}}\left(E\right) \,, \tag{7}$$

где E_n – дискретные уровни энергии, обусловленные квантованием в ограниченном объёме, а $g_{\text{bulk}}\left(E\right)$ – объёмная плотность состояний. Для мезоскопических волокон или кластеров с хаотическим рассеянием на границах вводится дополнительный множитель, описывающий локализацию электронов:

$$g_{\text{eff}}\left(E\right) = g_{\text{bulk}}\left(E\right) \exp\left(-\frac{L}{L_\phi}\right) \,, \tag{8}$$

где L_ϕ – длина фазовой когерентности. Подвижность $\mu_{\text{eff}}(E)$ также зависит от размера зёрен и температуры:

$$\mu_{\text{eff}}(E) = \mu_0 \left(1 + \frac{L}{d}\right)^{-1} \cdot \exp\left(-\sqrt{\frac{E - E_c}{E_0}}\right), \tag{9}$$

где E_c – энергетический барьер на границах зёрен, E_0 – характерная энергия, связанная с флуктуациями потенциала, а μ_0 – подвижность в объёме зерна. Подстановка этих выражений в формулу для $S(T)$ позволяет получить аналитическую зависимость коэффициента Зеебека от температуры, размера зёрен и типа мезоскопической структуры.

Особое внимание следует уделить мезоскопическим кольцам, где из-за эффекта Ааронова-Бома и интерференции электронных волн коэффициент Зеебека может демонстрировать осцилляции при изменении магнитного потока через кольцо. Для такого случая эффективная плотность состояний становится зависимой от магнитного потока Ф:

$$g_{\text{eff}}(E, \Phi) = g_{\text{bulk}}(E) \left[1 + 2\sum_{m=1}^{\infty} \cos\left(\frac{2\pi m \Phi}{\Phi_0}\right) \exp\left(-\frac{mL}{L_\phi}\right)\right], \tag{10}$$

где $\Phi_0 = h/e$ – квант магнитного потока. Это приводит к модификации коэффициента Зеебека:

$$S(T, \Phi) = \frac{\pi^2 k_B^2 T}{3e} \left[\frac{1}{g_{\text{eff}}(E, \Phi)} \frac{\partial g_{\text{eff}}(E, \Phi)}{\partial E} + \frac{1}{\mu_{\text{eff}}(E)} \frac{\partial \mu_{\text{eff}}(E)}{\partial E}\right]_{E=E_F}. \tag{11}$$

В условиях сильного рассеяния на границах зёрен плотность электронных состояний $g(E)$ испытывает существенные изменения. Для нанокристаллической системы с хаотичным распределением границ зёрен можно использовать эффективную плотность состояний, учитывающую квантовые коррекции и граничные эффекты:

$$g_{\text{eff}}(E) = g_{\text{bulk}}(E) \left[1 + \sum_i \delta(E - E_i) f_i(L)\right], \tag{12}$$

где $g_{\text{bulk}}(E)$ – объёмная плотность состояний, E_i – дискретные уровни энергии, обусловленные квантованием в ограниченных объёмах (например, в наноточках или мезоскопических кольцах), а $f_i(L)$ – функция, описывающая вероятность нахождения состояния с энергией E_i в объёме зерна размера L. Для сферических наноточек с диаметром d функция $f_i(L)$ может быть представлена в виде:

$$f_i(d) = \frac{4\pi d^3}{3} \frac{1}{V_0} \exp\left(-\frac{E_i - E_F}{E_c}\right), \tag{13}$$

где V_0 – объём элементарной ячейки, E_c – характерная энергия, связанная с флуктуациями потенциала на границах. Подвижность носителей $\mu(E)$ также модифицируется из-за рассеяния на границах и квантовых интерференционных эффектов. В рамках модели Майсснера для сферических зёрен с учётом энергии активации на границах подвижность можно записать как:

$$\mu_{\text{eff}}(E) = \mu_0 \exp\left(-\frac{E_a}{k_B T}\right) \left(1 + \frac{L}{d}\right)^{-1}, \tag{14}$$

где μ_0 – подвижность в объёме зерна, E_a – энергия активации для перехода через границу, T – температура. Подставляя модифицированные выражения для $g_{\text{eff}}(E)$ и $\mu_{\text{eff}}(E)$

в формулу Мотта (5), получаем выражение для коэффициента Зеебека в нанокристаллической керамике:

$$S(T) = \frac{\pi^2 k_B^2 T}{3e} \left[\frac{1}{g_{\text{bulk}}(E_F)} \frac{dg_{\text{bulk}}(E)}{dE} \left(1 + \sum_i \frac{\delta(E_i - E_F)}{g_{\text{bulk}}(E_F)} f_i(L) \right) + \frac{1}{\mu_{\text{eff}}(E_F)} \frac{d\mu_{\text{eff}}(E)}{dE} \right]_{E=E_F} . \quad (15)$$

Для мезоскопических колец с учётом эффекта Ааронова-Бома плотность состояний становится функцией магнитного потока Φ:

$$g_{\text{eff}}(E, \Phi) = g_{\text{bulk}}(E) \left[1 + \sum_{m=1}^{\infty} \cos\left(\frac{2\pi m \Phi}{\Phi_0} \right) \exp\left(-\frac{mL}{L_\phi} \right) \right] , \quad (16)$$

где $\Phi_0 = h/e$ – квант магнитного потока. Это приводит к модификации коэффициента Зеебека:

$$S(T, \Phi) = \frac{\pi^2 k_B^2 T}{3e} \left[\frac{1}{g_{\text{eff}}(E_F, \Phi)} \frac{\partial g_{\text{eff}}(E, \Phi)}{\partial E} + \frac{1}{\mu_{\text{eff}}(E_F)} \frac{d\mu_{\text{eff}}(E)}{dE} \right]_{E=E_F} . \quad (17)$$

В мезоскопических волокнах и кластерах наблюдаются дополнительные эффекты, связанные с анизотропией границ и канализацией тепловых потоков. Для волокон с диаметром d и длиной L коэффициент Зеебека можно записать с учётом аксиального и радиального градиентов температуры:

$$S_{\text{fiber}}(T) = S_{\text{bulk}}(T) \left(1 + \alpha \frac{L}{d} \right) , \quad (18)$$

где α – коэффициент, учитывающий анизотропию границ. В кластерах с хаотичным распределением зёрен коэффициент Зеебека испытывает флуктуации из-за локальных вариаций плотности состояний и подвижности:

$$S_{\text{cluster}}(T) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} S_i(T) , \quad (19)$$

где N – число зёрен в кластере, а $S_i(T)$ – локальный коэффициент Зеебека для i-го зерна. Таким образом, в мезоскопических системах на основе нанокристаллической керамики коэффициент Зеебека проявляет сложную зависимость от температуры, геометрии структур и внешних полей, что открывает возможности для управления термоэлектрическими свойствами путём изменения морфологии и микроструктуры материала.

Эффект Пельтье в мезоскопических системах на основе нанокристаллической керамики

Эффект Пельтье в мезоскопических системах на основе нанокристаллической керамики проявляется в виде поглощения или выделения тепла при протекании электрического тока через контакт двух различных материалов или через неоднородную структуру. В мезоскопических системах коэффициент Пельтье Π зависит от распределения электронов и фононов на границах зёрен, а также от квантовых эффектов в ограниченных объёмах. В мезоскопических системах на основе нанокристаллической керамики этот эффект усиливается за счёт высокой плотности границ зёрен, где происходит неравновесное распределение электронов и фононов. Коэффициент Пельтье Π связан с коэффициентом Зеебека соотношением Онсагера: $\Pi = TS$, однако в мезоскопических системах это соотношение может нарушаться из-за размерных эффектов и локализации электронов.

Для анализа эффекта Пельтье в нанокристаллической керамике рассмотрим поток тепла $\mathbf{Q}$ в уравнении (3) с учётом эффективных параметров. В линейном приближении плотность теплового потока определяется следующим образом:

$$\mathbf{Q} = \Pi(T)\,\mathbf{j} - \kappa(T)\,\nabla T\ , \tag{20}$$

где $\Pi(T)$ – эффективный коэффициент Пельтье, который в мезоскопических системах зависит от распределения электронов на границах зёрен и квантовых флуктуаций. В соответствии с соотношением Онсагера $\Pi = TS$, коэффициент Пельтье в нанокристаллической керамике можно выразить через модифицированный коэффициент Зеебека. Однако в мезоскопических системах необходимо учитывать дополнительные вклады, связанные с рассеянием на границах и квантовыми эффектами. Для нанокристаллической керамики с учётом эффективной плотности состояний и подвижности коэффициент Пельтье записывается как:

$$\Pi(T) = \frac{T}{e}\int_{-\infty}^{\infty} dE\,\frac{E-E_F}{T}\left(-\frac{\partial f(E)}{\partial E}\right) g_{\text{eff}}(E)\,\mu_{\text{eff}}(E)\ , \tag{21}$$

где $f(E)$ – функция распределения Ферми-Дирака. При низких температурах ($T \ll E_F$) интеграл можно разложить в ряд по степеням T/E_F, что даёт выражение:

$$\Pi(T) \approx \frac{\pi^2 k_B^2 T^2}{3eE_F}\left[\frac{g_{\text{eff}}(E_F)}{g_{\text{bulk}}(E_F)}\left(1+\frac{1}{\mu_{\text{eff}}(E_F)}\frac{d\mu_{\text{eff}}(E)}{dE}\right)\right]\ . \tag{22}$$

В случае слабого рассеяния и малых температурных градиентов можно воспользоваться выражением для $\Pi(T)$, вытекающим из феноменологических уравнений Онсагера:

$$\Pi(T) = \frac{T}{e}\left\langle\frac{E-\mu}{T}\right\rangle\ , \tag{23}$$

где угловые скобки обозначают усреднение по распределению Ферми–Дирака. Для нанокристаллической керамики с учётом дискретности уровней и рассеяния на границах это усреднение модифицируется

$$\left\langle\frac{E-\mu}{T}\right\rangle = \int dE\,\frac{E-\mu}{T}\left(-\frac{\partial f(E)}{\partial E}\right) g_{\text{eff}}(E)\,\mu_{\text{eff}}(E)\ , \tag{24}$$

где $f(E)$ – функция распределения Ферми-Дирака. Подстановка эффективной плотности состояний и подвижности позволяет выразить $\Pi(T)$ через интеграл:

$$\Pi(T) = \frac{T}{e}\int dE\,\frac{E-\mu}{T}\left(-\frac{\partial f(E)}{\partial E}\right) g_{\text{bulk}}(E)\left(1+\frac{L}{L_\phi}\right)^{-1}\mu_0\exp\left(-\frac{L}{d}\right)\exp\left(-\sqrt{\frac{E-E_c}{E_0}}\right)\ . \tag{25}$$

В пределе низких температур ($T \ll E_F$) этот интеграл может быть приближён с использованием разложения в ряд по степеням T/E_F, что даёт:

$$\Pi(T) \approx \frac{\pi^2 k_B^2 T}{3e}\frac{g_{\text{eff}}(E_F)}{g_{\text{bulk}}(E_F)}\left[1+\frac{1}{\mu_{\text{eff}}(E_F)}\frac{d\mu_{\text{eff}}(E)}{dE}\right]_{E=E_F}\ . \tag{26}$$

Для мезоскопических колец с учётом эффекта Ааронова-Бома коэффициент Пельтье становится функцией магнитного потока Φ:

$$\Pi(T,\Phi) = \frac{T}{e}\int_{-\infty}^{\infty} dE\,\frac{E-E_F}{T}\left(-\frac{\partial f(E)}{\partial E}\right) g_{\text{eff}}(E,\Phi)\,\mu_{\text{eff}}(E)\ . \tag{27}$$

Эта зависимость приводит к осцилляциям эффекта Пельтье при изменении магнитного поля, что может быть использовано для создания высокочувствительных термоэлектрических датчиков. В мезоскопических кольцах с учётом эффекта Ааронова-Бома коэффициент Пельтье демонстрирует осцилляции при изменении магнитного потока Φ:

$$\Pi\left(T,\Phi\right)=\Pi_0\left(T\right)\left[1+\sum_{m=1}^{\infty}\cos\left(\frac{2\pi m\Phi}{\Phi_0}\right)\exp\left(-\frac{mL}{L_\phi}\right)\right]\ , \tag{28}$$

где $\Pi_0\left(T\right)$ – коэффициент Пельтье в отсутствие магнитного поля. В мезоскопических волокнах коэффициент Пельтье модифицируется из-за анизотропии границ и канализации тепловых потоков:

$$\Pi_{\text{fiber}}\left(T\right)=\Pi_{\text{bulk}}\left(T\right)\left(1+\gamma\frac{L}{d}\right)\ , \tag{29}$$

где γ – коэффициент, учитывающий анизотропию границ. В кластерах коэффициент Пельтье усредняется по всем зернам:

$$\Pi_{\text{cluster}}\left(T\right)=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\Pi_i\left(T\right)\ , \tag{30}$$

где N – число зёрен в кластере, а $\Pi_i\left(T\right)$ – локальный коэффициент Пельтье для i-го зерна.

Особое внимание следует уделить влиянию фононного рассеяния на границах зёрен. В нанокристаллической керамике фононное рассеяние на границах зёрен приводит к дополнительным тепловым потерям, что влияет на эффективный коэффициент Пельтье. В нанокристаллической керамике теплопроводность $\kappa\left(T\right)$ можно описать как:

$$\kappa\left(T\right)=\kappa_{\text{el}}\left(T\right)\left(1+\frac{L}{d}\right)^{-1}F\left(T,L\right)+\kappa_{\text{ph}}\left(T\right)\ , \tag{31}$$

где $\kappa_{\text{el}}\left(T\right)$ – электронная теплопроводность монокристаллического материала, $\kappa_{\text{ph}}\left(T\right)$ – фононная теплопроводность, а $F\left(T,L\right)$ – функция, описывающая дополнительное рассеяние фононов на границах. Это влияет на эффективный коэффициент Пельтье через тепловые потери и неравновесное распределение фононов. Электронная теплопроводность в нанокристаллической керамике модифицируется из-за рассеяния на границах:

$$\kappa_{\text{el}}\left(T\right)=\frac{\pi^2k_B^2T}{3e^2}\sigma_{\text{eff}}\left(T\right)\ , \tag{32}$$

где $\sigma_{\text{eff}}\left(T\right)$ – эффективная электропроводность (4). Фононная теплопроводность в нанокристаллических системах описывается с учётом рассеяния на границах зёрен:

$$\kappa_{\text{ph}}\left(T\right)=\kappa_{0,\text{ph}}\left(1+\frac{L}{d}\right)^{-1}F\left(T,L\right)\ , \tag{33}$$

где $\kappa_{0,\text{ph}}$ – фононная теплопроводность монокристаллического материала, а $F\left(T,L\right)$ – функция, описывающая дополнительное рассеяние фононов на границах. В случае наноточек и кластеров функция $F\left(T,L\right)$ может быть представлена как:

$$F\left(T,L\right)=\exp\left(-\frac{T_c}{T}\right)\left(1+\beta\frac{L}{d}\right)^{-1}\ , \tag{34}$$

где T_c – характерная температура, связанная с активацией фононных мод на границах, β – коэффициент, учитывающий геометрию структуры мезоскопической системы.

В системах с наноточками или кластерами эффект Пельтье может усиливаться за счёт кулоновской блокады и квантовых точек, где локализация электронов приводит к нелинейной зависимости $\Pi(T)$. В таких случаях необходимо учитывать коррекции, связанные с квантовыми интерференционными эффектами и туннельным транспортом через границы. Таким образом, эффект Пельтье в мезоскопических нанокристаллических системах демонстрирует богатую физику, связанную с взаимодействием электронных и фононных процессов на мезоскопическом уровне.

Термоэлектрические свойства мезоскопических систем на основе нанокристаллической керамики

Мезоскопические системы на основе различной нанокристаллической керамики представляют собой уникальные объекты, где проявляются как квантовые эффекты, так и классические граничные явления. Когда размер зёрен L становится сопоставимым с длиной когерентности электронов L_ϕ, возникают квантовые размерные эффекты, в то время как высокая плотность границ зёрен приводит к существенному рассеянию носителей заряда и фононов.

Термоэлектрическая добротность является ключевым параметром для оценки эффективности термоэлектрических материалов. Термоэлектрическая добротность определяется как безразмерная величина, характеризующая отношение полезной мощности, генерируемой или поглощаемой в термоэлектрическом устройстве, к потере тепла за счёт теплопроводности. Для расчёта термоэлектрической добротности ZT нанокристаллической керамики в мезоскопической системе используются модели упругого рассеяния носителей на границах зёрен и феноменологическая модель. Формула термоэлектрической добротности имеет вид:

$$ZT = \frac{S^2\sigma}{\kappa_e + \kappa_l} T \,, \tag{35}$$

где S – коэффициент Зеебека, σ – удельная электропроводность (в нанокерамике она падает из-за барьеров на границах зёрен: $\sigma = \sigma_0 f(D)$, где D – размер зерна), κ_e – электронная теплопроводность, которая связана со статической проводимостью законом Видемана-Франца $\kappa_e = L\sigma T$, где L – число Лоренца, κ_l – решёточная теплопроводность, которая сильно снижается в мезосистемах из-за рассеяния фононов на границах зёрен, T – абсолютная температура. Электропроводность нанокристаллической керамики сильно зависит от рассеяния носителей на границах зёрен. Используя модель Майсснера для сферических зёрен диаметром d, эффективную проводимость можно записать как:

$$\sigma_{\text{eff}} = \sigma_0 \left(1 + \frac{\ell}{d}\right)^{-1} \,, \tag{36}$$

где σ_0 – проводимость монокристаллического материала, ℓ – длина свободного пробега в объёме зерна. Термо-ЭДС в условиях сильного рассеяния на границах описывается модифицированной формулой Мотта:

$$S(T) = \frac{\pi^2 k_B^2 T}{3e} \left[\frac{1}{g(E)}\frac{dg(E)}{dE} + \frac{1}{\mu(E)}\frac{d\mu(E)}{dE}\right]_{E=E_F} \,, \tag{37}$$

где k_B – постоянная Больцмана, e – заряд электрона, $g(E)$ – плотность состояний, $\mu(E)$ – энергетическая зависимость подвижности, E_F – энергия Ферми. Для параболической

зоны и рассеяния на акустических фононах это даёт:

$$S = \frac{\pi^2 k_B^2 T}{3eE_F} \, . \tag{38}$$

В нанокристаллических системах плотность состояний модифицируется квантовыми эффектами. Для сферической квантовой точки радиуса R в модели сильной связи плотность состояний принимает вид суммы дельта-функций:

$$g_{\text{dot}}\,(E) = \frac{2}{V_{\text{dot}}} \sum_{n,l,m} \delta(E - E_{n,l}), \tag{39}$$

где $E_{n,l} = \frac{\hbar^2 \chi_{n,l}^2}{2m^* R^2}$, $\chi_{n,l}$ – корни сферических функций Бесселя, m^* – эффективная масса, $V_{\text{dot}} = \frac{4}{3}\pi R^3$. Усреднение по ансамблю зёрен с распределением по размерам $f\,(R)$ даёт:

$$\langle g\,(E)\rangle = \int_0^\infty g_{\text{dot}}(E;R) f\,(R)\, dR \, . \tag{40}$$

Теплопроводность κ складывается из электронной κ_e и фононной κ_{ph} составляющих: $\kappa = \kappa_e + \kappa_{ph}$. Электронная часть связана с проводимостью соотношением Видемана-Франца:

$$\kappa_e = L_0 \sigma T, \tag{41}$$

где $L_0 = \frac{\pi^2 k_B^2}{3e^2}$ – число Лоренца. Фононная теплопроводность в нанокристаллической керамике ограничена рассеянием на границах зёрен, дислокациях и точечных дефектах. В модели Каллавэя эффективная длина свободного пробега фононов ℓ_{ph} определяется из правила Маттиссена:

$$\ell_{ph}^{-1} = \ell_B^{-1} + \ell_D^{-1} + \ell_{PD}^{-1} \, , \tag{42}$$

где $\ell_B \approx d$ – вклад границ зёрен, ℓ_D – вклад дислокаций, ℓ_{PD} – вклад точечных дефектов. Тогда:

$$\kappa_{ph} = \frac{1}{3} C_{ph} v_s \ell_{ph}, \tag{43}$$

где C_{ph} – фононная теплоёмкость, v_s – скорость звука. Для оценки термоэлектрической эффективности используется безразмерный параметр ZT:

$$ZT = \frac{S^2 \sigma T}{\kappa}. \tag{44}$$

Оптимизация ZT требует одновременного увеличения $S^2\sigma$ (так называемого фактора мощности) и уменьшения κ. В нанокристаллических системах это достигается за счёт увеличения рассеяния фононов на границах при сохранении электронного транспорта через туннелирование. Вероятность туннелирования через границу зерна толщиной δ с барьером высотой U описывается приближением Вентцеля-Крамерса-Бриллюэна:

$$T_{\text{tun}}\,(E) = \exp\left(-2 \int_0^\delta \sqrt{\frac{2m^*}{\hbar^2}\,(U\,(x) - E)}\, dx \right) \, . \tag{45}$$

Для прямоугольного барьера вероятность туннелирования описывается выражением:

$$T_{\text{tun}} = \exp\left(-2\delta \sqrt{\frac{2m^*(U-E)}{\hbar^2}} \right) \, . \tag{46}$$

Тогда эффективная проводимость межзёренных контактов пропорциональна T_{tun}. Учёт туннелирования модифицирует выражение для проводимости:

$$\sigma_{\text{tot}} = \sigma_{\text{eff}} \cdot \frac{T_{\text{tun}}}{1 - T_{\text{tun}}} \, . \tag{47}$$

Термо-ЭДС композитной системы, состоящей из зёрен и барьеров, может быть оценена в модели последовательных элементов:

$$S_{\text{tot}} = \frac{S_g \sigma_g^{-1} + S_b \sigma_b^{-1}}{\sigma_g^{-1} + \sigma_b^{-1}} \, , \tag{48}$$

где индексы g и b относятся к зерну и барьеру соответственно. Фактор мощности тогда:

$$PF = S_{\text{tot}}^2 \sigma_{\text{tot}} \, . \tag{49}$$

Для численного анализа удобно ввести безразмерные параметры: $x = d/\ell$, $u = U/E_F$, $\delta_r = \delta/d$. Тогда ключевые соотношения принимают вид:

$$\sigma_{\text{tot}}^* = \frac{1}{1 + x^{-1}} \frac{\exp(-2\delta_r x\sqrt{u})}{1 - \exp(-2\delta_r x\sqrt{u})} \, , \tag{50}$$

$$S^* = \frac{S_g^* + S_b^* \exp(2\delta_r x\sqrt{u})}{1 + \exp(2\delta_r x\sqrt{u})} \, , \tag{51}$$

где звёздочка обозначает нормировку на соответствующие монокристаллические значения. Теплопроводность, нормированная на фононную составляющую монокристалла κ_{ph0}, будет:

$$\kappa_{ph}^* = \left(1 + \frac{\Lambda}{d} + Bd\right)^{-1} , \tag{52}$$

где Λ – длина свободного пробега фононов в объёме, B – параметр, учитывающий рассеяние на дислокациях. Окончательно:

$$ZT^* = \frac{\left(S^*\right)^2 \sigma_{\text{tot}}^*}{\kappa_e^* + \kappa_{ph}^*} \, . \tag{53}$$

Термоэлектрическая добротность связана с максимальным коэффициентом полезного действия термоэлектрического генератора или холодильника. Например, для термоэлектрического генератора коэффициент полезного действия определяется выражением:

$$\eta = \frac{T_h - T_c}{T_h} \frac{\sqrt{1 + ZT_m} - 1}{\sqrt{1 + ZT_m} + \frac{T_c}{T_h}} \, , \tag{54}$$

где T_h и T_c – температуры горячего и холодного спаев соответственно, T_m – средняя температура между T_h и T_c. Отсюда видно, что ZT напрямую влияет на коэффициент полезного действия термоэлектрического устройства.

Данные выражения составляют основу для численного моделирования термоэлектрических свойств.

Термомагнитные свойства мезоскопических систем на основе нанокристаллической керамики

При наличии внешнего магнитного поля $\mathbf{B}$ в уравнениях переноса появляются дополнительные члены, обусловленные силой Лоренца. В изотропном случае для продольных и поперечных (относительно $\mathbf{B}$) компонент тензоров проводимости и термо-ЭДС используются приближения, следующие из решения кинетического уравнения. Электропроводность в магнитном поле описывается тензором:

$$\hat{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & 0 \\ -\sigma_{xy} & \sigma_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{zz} \end{pmatrix} , \tag{55}$$

где для сферической поверхности Ферми в приближении времени релаксации τ:

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \frac{\sigma_0}{1 + (\omega_c \tau)^2} , \tag{56}$$

$$\sigma_{xy} = \frac{\sigma_0 \omega_c \tau}{1 + (\omega_c \tau)^2} , \tag{57}$$

$$\sigma_{zz} = \sigma_0 . \tag{58}$$

Здесь $\omega_c = eB/m^*$ – циклотронная частота, $\sigma_0 = ne^2\tau/m^*$ – проводимость при $B = 0$. В нанокристаллической керамике время релаксации τ определяется рассеянием на границах зёрен. В модели для тонкой плёнки толщиной d эффективное время релаксации имеет вид:

$$\frac{1}{\tau_{\text{eff}}} = \frac{1}{\tau_0} + \frac{v_F}{d}(1 - p) , \tag{59}$$

где τ_0 – время релаксации в объёме, v_F – скорость Ферми, p – коэффициент зеркального отражения от границ ($0 \leq p \leq 1$). Для сферических зёрен аналогичное выражение получается усреднением по направлениям:

$$\tau_{\text{eff}}^{-1} = \tau_0^{-1} + \frac{v_F}{d}\langle 1 - \cos\theta \rangle (1 - p) , \tag{60}$$

где θ – угол рассеяния. Термомагнитные явления описываются тензором коэффициента Нернста-Эттингсгаузена. Коэффициент Нернста N связывает поперечное электрическое поле E_y и продольный градиент температуры $\nabla_x T$ при отсутствии электрического тока:

$$E_y = NB\nabla_x T . \tag{61}$$

В рамках модели с параболическим законом дисперсии:

$$N = \frac{\pi^2 k_B^2 T}{3m^*} \frac{\partial}{\partial E} \left(\frac{\mu(E)}{1 + (\omega_c \tau)^2} \right)_{E=E_F} , \tag{62}$$

где $\mu(E)$ – энергозависимая подвижность. Для постоянного времени релаксации это упрощается до:

$$N = \frac{\pi^2 k_B^2 T \tau}{3m^* E_F} \frac{1 - (\omega_c \tau)^2}{(1 + (\omega_c \tau)^2)^2} . \tag{63}$$

Коэффициент Эттингсгаузена P определяет поперечный градиент температуры при протекании продольного тока J_x:

$$\nabla_y T = PBJ_x . \tag{64}$$

Согласно соотношению Онсагера, $P = TN/\kappa_{xx}$, где κ_{xx} – продольная теплопроводность в магнитном поле. Термоэлектрическая эффективность в магнитном поле может быть охарактеризована магнитным аналогом параметра ZT, например, для поперечных компонент:

$$ZT_{xy} = \frac{S_{xy}^2 \sigma_{xx} T}{\kappa_{xx}} \ . \tag{65}$$

Здесь S_{xy} – поперечная термо-ЭДС (термомагнитный коэффициент), которая в простейшем случае связана с коэффициентом Нернста: $S_{xy} = NB$. Таким образом, исследование термомагнитных свойств сводится к вычислению компонент тензоров $\hat{\sigma}\,(B)$, $\hat{S}\,(B)$, $\hat{\kappa}\,(B)$ с учётом граничного рассеяния. Для численного моделирования удобно ввести безразмерную магнитную индукцию $b = \omega_c \tau_{\text{eff}} = \mu B$, где $\mu = e\tau_{\text{eff}}/m^*$ – подвижность. Тогда:

$$\sigma_{xx}^* = \frac{1}{1+b^2} \ , \tag{66}$$

$$\sigma_{xy}^* = \frac{b}{1+b^2} \ , \tag{67}$$

$$N^* = \frac{1-b^2}{(1+b^2)^2} \ , \tag{68}$$

где звёздочка означает нормировку на значения при $B = 0$. Поперечная термо-ЭДС: $S_{xy}^* = N^* b$. Эффект влияния размера зёрен проявляется через зависимость $\tau_{\text{eff}}(d)$, а значит и $b\,(d)$. Подставляя (60), получаем:

$$b = \frac{eB\tau_0}{m^*} \left(1 + \frac{v_F \tau_0}{d} \langle 1 - \cos\theta \rangle (1-p)\right)^{-1} \ . \tag{69}$$

Таким образом, с уменьшением размера зёрен эффективный параметр b уменьшается, что ослабляет термомагнитные эффекты. Однако в реальных системах может наблюдаться и обратная зависимость из-за изменения механизма рассеяния (например, переход от зеркального к диффузному отражению). Также следует учитывать возможное квантование электронных состояний в магнитном поле (эффект де Гааза-ван Альфена), которое становится заметным при выполнении условия $\hbar\omega_c > k_B T$ и высокой подвижности. В нанокристаллических системах из-за сильного рассеяния квантовые осцилляции обычно подавлены, но их остаточное влияние может наблюдаться в виде осцилляционной зависимости термо-ЭДС от $1/B$.

Термооптические свойства мезоскопических систем на основе нанокристаллической керамики

Термооптические явления в различных мезоскопических нанокерамических системах связаны с изменением оптических характеристик (коэффициентов поглощения, отражения, пропускания) под действием температурного градиента или в результате нагрева. Основным механизмом является температурная зависимость диэлектрической проницаемости $\varepsilon\,(T)$, которая в инфракрасном диапазоне для полупроводников и диэлектриков определяется взаимодействием излучения с фононами и свободными носителями. В приближении гармонического осциллятора (модель Лоренца) диэлектрическая функция имеет вид:

$$\varepsilon\,(\omega, T) = \varepsilon_\infty + \sum_j \frac{S_j \omega_{TOj}^2}{\omega_{TOj}^2 - \omega^2 - i\gamma_j \omega} + \frac{\omega_p^2(T)}{-\omega^2 - i\Gamma(T)\omega} \ , \tag{70}$$

где ε_∞ – высокочастотная диэлектрическая проницаемость, S_j – сила осциллятора j-й поперечной оптической моды с циклической частотой ω_{TOj} и коэффициентом затухания γ_j, $\omega_p(T) = \sqrt{n(T)\,e^2/(\varepsilon_0 m^*)}$ – плазменная частота, зависящая от концентрации свободных носителей $n(T)$, $\Gamma(T)$ – частота столкновений носителей. В нанокристаллической керамике частоты ω_{TOj} могут сдвигаться из-за квантового ограничения фононов в зёрнах и наличия напряжений на границах. Сдвиг частоты поперечных оптических фононов в сферическом нанокристаллите радиуса R можно оценить в модели непрерывной среды:

$$\Delta\omega_{TO} \approx -\frac{\alpha}{R}\,, \tag{71}$$

где α – параметр, зависящий от соотношения диэлектрических проницаемостей зерна и границы. Коэффициент поглощения α_{opt} связан с мнимой частью диэлектрической функции ε'':

$$\alpha_{\text{opt}}(\omega, T) = \frac{\omega}{cn(\omega)}\varepsilon''(\omega, T)\ , \tag{72}$$

где $n(\omega) = \sqrt{(\varepsilon' + \sqrt{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2})/2}$ – показатель преломления, c – скорость света. Температурная зависимость α_{opt} возникает как из-за изменения $\omega_p(T)$ (рост концентрации носителей с температурой увеличивает поглощение на свободных носителях), так и из-за уширения фононных линий (рост $\gamma_j(T)$). В области прозрачности ($\hbar\omega < E_g$, где E_g – ширина запрещённой зоны) поглощение может быть обусловлено многофононными процессами и дефектами. Для керамики с размерами зёрен меньше длины волны излучения необходимо также учитывать рассеяние на границах, которое описывается теорией Ми для сферических частиц. Эффективный коэффициент экстинкции (сумма поглощения и рассеяния) ансамбля зёрен с распределением по размерам $f(R)$ равен:

$$\alpha_{\text{ext}}(\omega) = \int_0^\infty \pi R^2 Q_{\text{ext}}(R, \omega)\, N f(R)\, dR\,, \tag{73}$$

где Q_{ext} – фактор эффективности экстинкции для частицы радиуса R, N – концентрация зёрен. В приближении $2\pi R/\lambda \ll 1$ (рассеяние Рэлея) $Q_{\text{ext}} \propto R^3$, что даёт $\alpha_{\text{ext}} \propto \langle R^3 \rangle$. Таким образом, уменьшение размера зёрен снижает рассеяние и может увеличить оптическую прозрачность керамики. Термооптический коэффициент dn/dT, характеризующий изменение показателя преломления с температурой, складывается из электронного, фононного и деформационного вкладов. Для полупроводников в инфракрасной области основной вклад даёт изменение концентрации носителей:

$$\frac{dn}{dT} \approx \frac{e^2\lambda^2}{8\pi^2 c^2 \varepsilon_0 n m^*}\,, \tag{74}$$

где λ – длина волны. В нанокристаллических системах dn/dT может быть усилен из-за дополнительного температурного сдвига края поглощения, обусловленного квантовым ограничением (эффект Блюстейна–Гуляева). Для численного моделирования термооптических характеристик удобно параметризовать температурные зависимости: $n(T) = n_0 + \beta_n(T - T_0)$, $\alpha_{\text{opt}}(T) = \alpha_0 \exp(T/T_1)$ для поглощения на свободных носителях. Тогда коэффициент пропускания плоскопараллельной пластинки толщиной L с учётом многократных отражений:

$$\mathcal{T}(\omega, T) = \frac{(1-R)^2 \exp(-\alpha_{\text{ext}} L)}{1 - R^2 \exp(-2\alpha_{\text{ext}} L)}\,, \tag{75}$$

где $R = \left|\frac{n-1}{n+1}\right|^2$ – коэффициент отражения на границе раздела воздух-керамика. Термооптический эффект, используемый в датчиках и модуляторах, часто характеризуется

изменением пропускания при изменении температуры: $\Delta\mathcal{T}/\Delta T$. Из (75) можно получить:

$$\frac{\Delta\mathcal{T}}{\Delta T} \approx -\mathcal{T}\left(\frac{2}{1-R}\frac{dR}{dT} + L\frac{d\alpha_{\text{ext}}}{dT}\right) , \tag{76}$$

где $dR/dT = \frac{4(n^2-1)}{(n+1)^4}\frac{dn}{dT}$. Таким образом, чувствительность термооптического отклика определяется как dn/dT, так и $d\alpha_{\text{ext}}/dT$. В нанокристаллической керамике оба параметра могут быть увеличены за счёт квантово-размерных эффектов и высокой плотности границ зёрен.

Для электронов в потенциальной яме с бесконечно высокими стенками энергия квантования задаётся выражением:

$$E_n = \frac{\hbar^2\pi^2 n^2}{2m^* L^2} , \tag{77}$$

где n – квантовое число, m^* – эффективная масса электрона, $\hbar$ – приведённая постоянная Планка.

Плотность состояний в трёхмерной системе с квантованием по одному направлению:

$$g_{2D}(E) = \frac{m^*}{\pi\hbar^2}\sum_n \theta(E - E_n) , \tag{78}$$

где $\theta(x)$ – ступенчатая функция Хевисайда.

При переходе к мезоскопическому режиму расстояние между уровнями:

$$\Delta E = E_{n+1} - E_n = \frac{\hbar^2\pi^2(2n+1)}{2m^* L^2} \tag{79}$$

для электронов в TiO_2 с $m^* = 10m_0$ даёт $\Delta E \approx 0.1$ эВ при $L = 10$ нм.

Средняя длина свободного пробега электронов с учётом граничного рассеяния имеет вид:

$$\frac{1}{l_{eff}} = \frac{1}{l_{bulk}} + \frac{p}{L} , \tag{80}$$

где p – коэффициент отражения от границы зерна ($0 \le p \le 1$).

Электропроводность по модели Друде с учётом эффективной длины свободного пробега:

$$\sigma = \frac{n_e e^2\tau}{m^*} = \frac{n_e e^2 l_{eff}}{m^* v_F} , \tag{81}$$

где n_e – концентрация электронов, v_F – скорость на поверхности Ферми.

Подстановка (80) в (81) даёт:

$$\sigma(L) = \sigma_{bulk}\left(1 + \frac{p l_{bulk}}{L}\right)^{-1} . \tag{82}$$

Формула (82) показывает, что при уменьшении размера зёрен электропроводность убывает обратно пропорционально L. Это связано с доминированием граничного рассеяния, когда $L < l_{bulk}$.

Дисперсионное соотношение для фононов в квазидвумерной системе:

$$\omega_j(q) = \sqrt{\frac{4K}{M}\left|\sin\left(\frac{qa}{2}\right)\right| + \left(\frac{j\pi}{L}\right)^2 v_s^2} , \tag{83}$$

где K – константа силы межатомного взаимодействия, M – масса атома, a – межатомное расстояние, v_s – скорость звука, j – квантовое число фононного режима.

Плотность фононных состояний определяется выражением:

$$g_{ph}(\omega) = \frac{1}{(2\pi)^2} \sum_j \int \frac{d^2q}{|\nabla_q \omega_j(q)|} \delta(\omega - \omega_j(q)) \ , \tag{84}$$

Теплопроводность по модели Клеменса для нанокристаллов:

$$\kappa = \frac{1}{3} C_v v_s \Lambda_{eff} \ , \tag{85}$$

где C_v – теплоёмкость при постоянном объёме, Λ_{eff} – эффективная длина свободного пробега фононов.

Учёт граничного рассеяния фононов:

$$\frac{1}{\Lambda_{\text{eff}}} = \frac{1}{\Lambda_{bulk}} + \frac{2}{L} \frac{1 - p_{ph}}{1 + p_{ph}} \ , \tag{86}$$

где p_{ph} – коэффициент зеркального отражения фононов.

Для мезоскопических систем доминирует граничное рассеяние ($\Lambda_{\text{eff}} \approx L/2$), поэтому:

$$\kappa(L) \approx \frac{1}{6} C_v v_s L \ , \tag{87}$$

Согласно (87), теплопроводность в мезоскопическом режиме линейно зависит от размера зерна.

Коррекция к теплоёмкости электронного газа с учётом квантового эффекта Зоммерфельда определяется выражением:

$$C_e = \gamma T \left[1 - \frac{\pi}{2} \frac{\hbar v_F}{L k_B T} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n}{n} \sin\left(\frac{n L k_B T}{\hbar v_F} \right) \right] \tag{88}$$

где $\gamma = \frac{\pi^2}{2} n_e k_B^2 / E_F$ – коэффициент Зоммерфельда.

Частоты собственных колебаний зерна нанокристаллической керамики определяются следующим выражением:

$$\omega_{nlm} = \frac{\pi}{L} \sqrt{\frac{E}{\rho(1 - \nu^2)}} \sqrt{n^2 + l^2 + m^2} \ , \tag{89}$$

где ρ – плотность, ν – коэффициент Пуассона, n, l, m – квантовые числа.

Квантовая коррекция к коэффициенту теплового расширения:

$$\alpha(L) = \alpha_{\text{bulk}} \left[1 - \frac{\hbar \omega_D}{4 k_B T} \coth\left(\frac{\hbar \omega_D}{2 k_B T} \right) \frac{\lambda}{L} \right] \ , \tag{90}$$

где ω_D – частота Дебая, λ – длина ангармонического взаимодействия.

Физические свойства мезоскопических систем на основе нанокристаллической керамики существенно зависят от размера зёрен. Полученные аналитические выражения могут быть использованы для проектирования нанокерамических материалов с заданными физическими свойствами.

Результаты разработки компьютерной программы для численных расчётов физических характеристик мезоскопических систем на основе нанокристаллической керамики

Разработка компьютерной программы для расчёта термоэлектрической добротности ZT нанокристаллической керамики с учётом мезоскопических эффектов представляла собой итеративный процесс, начинающийся с физического обоснования модели и заканчивающийся визуализацией результатов в форме, доступной для дальнейшего анализа. На первом этапе разработки компьютерной программы была выявлена необходимость описания термоэлектрических свойств на двух уровнях абстракции: безразмерном, отражающем универсальные зависимости, и размерном, учитывающем конкретные физические параметры реальных материалов. Безразмерный подход позволял сосредоточиться на относительных размерах зёрен и потенциальных барьерах, исключая влияние постоянных, таких как заряд электрона или постоянная Больцмана, что обеспечивало обобщённость модели для различных материалов. Затем, на основе фундаментальных уравнений переноса и эмпирических зависимостей, была разработана функция $ZT_$dimless, где ключевыми элементами стали формулы для электропроводности, учитывающей экспоненциальное ослабление туннелирования через межзеренные барьеры, и теплопроводности, зависящей от конкуренции между электронными и фононными каналами теплопереноса. Это потребовало интеграции мезоскопических эффектов, таких как рассеяние электронов и фононов на границах зёрен, через безразмерные параметры, описывающие относительную высоту барьеров и их толщину.

На следующем этапе была разработана размерная версия теоретической модели в функции calculate$_ZT$, где физические константы и параметры, такие как длина свободного пробега электронов и фононов, коэффициент отражения на границах зёрен, а также базовые свойства материала (электропроводность, коэффициент Зеебека и решёточная теплопроводность), были введены с учётом реальных условий. Особое внимание было уделено модели Маядаса–Шатцкеса для расчёта электропроводности, которая описывает её резкое падение при уменьшении размера зёрен из-за усиленного рассеяния носителей заряда на границах. Здесь использовалась нелинейная зависимость, аппроксимирующая влияние границ и корректируемая для предотвращения нефизических осцилляций. Параллельно была учтена модификация коэффициента Зеебека за счёт фильтрации энергии в наноструктурах, а также зависимость теплопроводности от температуры и размера зёрен через модель Каллавея для фононного рассеяния, что дало возможность моделировать реальные процессы теплопереноса в наноматериалах.

После создания основных функциональных блоков разработчики перешли к подготовке численных данных для анализа, где была сформирована сетка параметров для размеров зёрен и температур с использованием библиотеки NumPy. Этот этап требовал точного масштабирования размеров зёрен из нанометров в метры и настройки диапазона температур, соответствующего рабочим условиям термоэлектрических устройств. Далее следовала визуализация результатов, начавшаяся с построения двумерных графиков зависимости ZT от размера зёрен при фиксированных температурах, что позволило выявить наличие оптимального размера зёрен, при котором достигается максимум термоэлектрической добротности. Этот график демонстрировал немонотонный характер зависимости, обусловленный балансом между уменьшением теплопроводности и снижением электрической проводимости.

Следующим шагом стала генерация контурных карт, где пространство параметров «размер зёрен–температура» было окрашено в зависимости от значений ZT, что наглядно выделило области с максимальной эффективностью. Контурные линии с метками значений позволили точно локализовать оптимальные условия эксплуатации ма-

териала, показывая, как повышение температуры или изменение размера зёрен влияет на термоэлектрические свойства. Наконец, трёхмерные поверхности дали наиболее полное представление о топологии термоэлектрической добротности ZT, подчеркнув как локальные экстремумы, так и глобальные тенденции, связанные с изменением температуры и структурных параметров. Такая визуализация не только подтвердила наличие нелинейных зависимостей, но и продемонстрировала сложность оптимизации наноматериалов, где необходимо учитывать как электрофизические, так и теплофизические свойства.

Завершение разработки включало интеграцию всех модулей в единую программу с возможностью быстрой генерации графиков и анализа чувствительности термоэлектрической добротности ZT к изменениям параметров. Это позволило не только объяснить физические механизмы, лежащие в основе наблюдаемых эффектов, но и предложить рекомендации по оптимизации структуры материала для повышения энергетической эффективности термоэлектрических преобразователей. В итоге программа стала мощным инструментом для количественного анализа и проектирования нанокристаллических термоэлектриков, обеспечивая как теоретическое понимание, так и практические алгоритмы для их применения.

Для проведения численного анализа полученных зависимостей физических величин была разработана компьютерная программа на языке программирования Python 2.7, использующая библиотеки NumPy, SciPy и Matplotlib. Компьютерная программа позволяет вычислять и визуализировать зависимости эффективной электропроводности σ_{eff}, термо-ЭДС S, теплопроводности κ и параметра ZT от размера зёрен d, концентрации дефектов, температуры T и высоты барьера U. Компьютерная программа позволяет вычислять и визуализировать компоненты тензоров проводимости σ_{xx}, σ_{xy} и коэффициента Нернста N в магнитном поле в зависимости от B и d. Компьютерная программа позволяет вычислять и визуализировать спектральные зависимости диэлектрической функции $\varepsilon(\omega)$, коэффициента поглощения $\alpha_{\text{opt}}(\omega)$ и пропускания $\mathcal{T}(\omega)$ при различных температурах и размерах зёрен. Фрагмент компьютерной программы на языке программирования Python для расчёта физических характеристик мезоскопических систем на основе нанокристаллической керамики показан на рис. 1.

Первый модуль компьютерной программы выполняет расчёт термоэлектрических параметров по формулам (4)–(53). Второй модуль компьютерной программы выполняет расчёт термомагнитных коэффициентов по формулам (66)–(69). Третий модуль компьютерной программы выполняет расчёт термооптических характеристик по формулам (70)–(76). Четвёртый модуль компьютерной программы выполняет построение двумерных, контурных графиков и графиков поверхностей. Ниже представлен фрагмент кода, реализующий расчёт параметра ZT в зависимости от размера зёрен и температуры.

```
# -*- coding: utf-8 -*-
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D
from matplotlib import cm
from matplotlib.ticker import LinearLocator, LogLocator, FormatStrFormatter

c = 2.99792458e+8
charge_e = 1.602176634e-19
k_B = 1.380648813e-23

def ZT_dimless(d, T, U=0.1, delta_r=0.01, Lambda=10.0, B_param=1e-3):
    d = np.asarray(d)
```

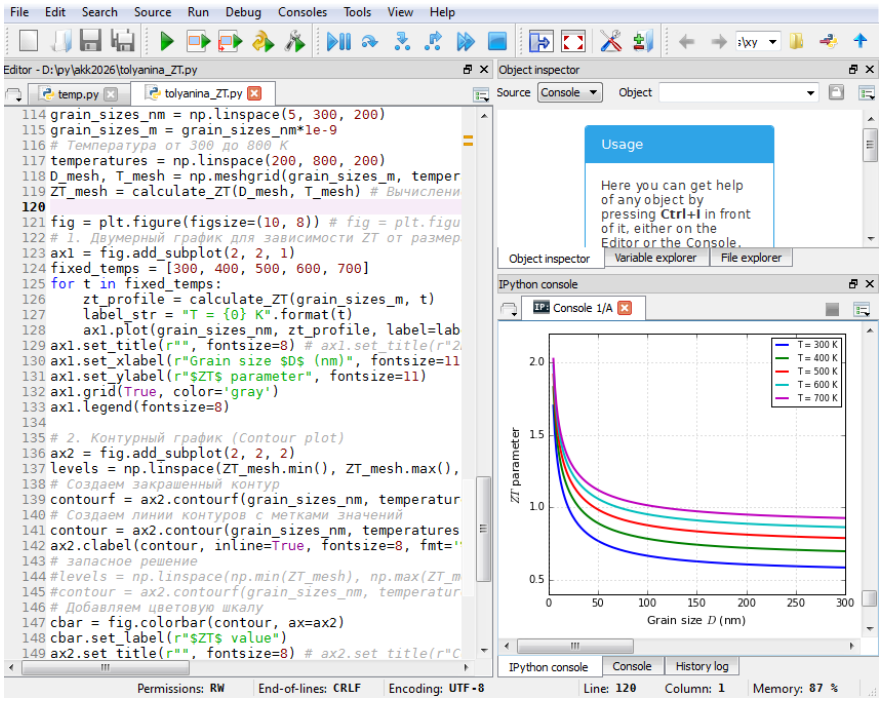


Рис. 1. Фрагмент компьютерной программы на языке программирования Python для расчёта физических характеристик мезоскопических систем на основе нанокристаллической керамики

```
    T = np.asarray(T)
    x = d/Lambda  # d/l
    sigma_total = 1.0/(1.0+1.0/x)*np.exp(-2.0*delta_r*x*np.sqrt(U))/(1.0-np.exp(-2.0*delta_r*x*np.sqrt(U)))
        S = (1.0+0.5*np.exp(2.0*delta_r*x*np.sqrt(U))) / (1.0+np.exp(2.0*delta_r*x*np.sqrt(U)))
    kappa_l = 1.0/(1.0+(Lambda/d)+B_param*d)
    kappa_e = sigma_total*T/T.mean()
    kappa_total = kappa_e+kappa_l
    Result = ((S**2)*sigma_total)/kappa_total
    return Result

def plot_ZT_dimless():
    d = np.linspace(5, 300, 200)
    T = np.linspace(200, 800, 200)
    D, T_grid = np.meshgrid(d, T)
    ZT = ZT_dimless(D, T_grid, U=0.15, delta_r=0.02)
    fig = plt.figure(figsize=(10, 6))
    ax = fig.gca(projection='3d')
    surf = ax.plot_surface(D, T_grid, ZT, cmap=cm.coolwarm, linewidth=0, antialiased=False)
    #ax.set_zlim(-1.01, 1.01)
    ax.zaxis.set_major_locator(LinearLocator(10))
    ax.zaxis.set_major_formatter(FormatStrFormatter('%.02f'))
    ax.set_xlabel(r"Grain size $D$ (nm)")
    ax.set_ylabel(r"Temperature $T$ (K)")
    ax.set_zlabel(r"$ZT$")
```

```
    cbar = fig.colorbar(surf, ax=ax, shrink=0.5, aspect=5)
    cbar.set_label(r"$ZT$ value")
    plt.show()

def calculate_ZT(D, T):
    L = 2.44e-8
    sigma_0 = 1.0e5
    S_0 = 200e-6
    kappa_l_0 = 1.5
    mean_free_path_e = 10e-9
    mean_free_path_ph = 40e-9
    R = 0.2
    alpha = (mean_free_path_e/D)*(R/(1.0-R))
    f_ms = 1.0-1.5*alpha+3.0*(alpha**2)-3.0*(alpha**3)*np.log(1.0+1.0/alpha)
    f_ms = np.clip(f_ms, 0.05, 1.0)
    sigma = sigma_0*f_ms
    S = S_0*(1.0+0.1*(mean_free_path_e/D))
    kappa_l = kappa_l_0/(1.0+(mean_free_path_ph/D))
    kappa_e = L*sigma*T
    kappa_total = kappa_e+kappa_l
    Result = ((S**2)*sigma*T)/kappa_total
    return Result

grain_sizes_nm = np.linspace(5, 300, 200)
grain_sizes_m = grain_sizes_nm*1e-9
temperatures = np.linspace(200, 800, 200)
D_mesh, T_mesh = np.meshgrid(grain_sizes_m, temperatures)
ZT_mesh = calculate_ZT(D_mesh, T_mesh)
fig = plt.figure(figsize=(9, 10))
ax1 = fig.add_subplot(2, 2, 1)
fixed_temps = [300, 400, 500, 600, 700]
for t in fixed_temps:
    zt_profile = calculate_ZT(grain_sizes_m, t)
    label_str = "T = {0} K".format(t)
    ax1.plot(grain_sizes_nm, zt_profile, label=label_str, linewidth=2)
ax1.set_title(r"", fontsize=8) # ax1.set_title(r"2D: $ZT$ vs grain size",
    fontsize=8)
ax1.set_xlabel(r"Grain size $D$ (nm)", fontsize=11)
ax1.set_ylabel(r"$ZT$ parameter", fontsize=11)
ax1.grid(True, color='gray')
ax1.legend(fontsize=8)
ax2 = fig.add_subplot(2, 2, 2)
levels = np.linspace(ZT_mesh.min(), ZT_mesh.max(), 40)
contourf = ax2.contourf(grain_sizes_nm, temperatures, ZT_mesh, levels=levels
    , cmap='summer_r')
contour = ax2.contour(grain_sizes_nm, temperatures, ZT_mesh, levels=levels,
    colors='black', linewidths=0.5)
ax2.clabel(contour, inline=True, fontsize=8, fmt='%.1f')
cbar = fig.colorbar(contour, ax=ax2)
cbar.set_label(r"$ZT$ value")
```

```
ax2.set_title(r"", fontsize=8) # ax2.set_title(r"Contour plot of $ZT(D, T)$
    ", fontsize=8)
ax2.set_xlabel(r"Grain size $D$ (nm)", fontsize=11)
ax2.set_ylabel(r"Temperature $T$ (K)", fontsize=11)
ax3 = fig.add_subplot(2, 1, 2, projection='3d')
surf = ax3.plot_surface(grain_sizes_nm, T_mesh, ZT_mesh, cmap='coolwarm',
                        linewidth=0, antialiased=False, alpha=0.9)
fig.colorbar(surf, ax=ax3, shrink=0.5, aspect=10, label=r"$ZT$ value")
ax3.set_title(r"") # ax3.set_title(r"3D Surface of $ZT$ parameter topology")
ax3.set_xlabel(r"Grain size $D$ (nm)")
ax3.set_ylabel(r"Temperature $T$ (K)")
ax3.set_zlabel(r"$ZT$")
ax3.view_init(elev=30, azim=135)
plt.tight_layout()
plt.show()

plot_ZT_dimless()
```

Листинг 1.1. Расчёт термоэлектрической дорбротности ZT

Программа на языке программирования Python, представленная на листинге 1.1, представляет собой комплексный инструмент для численного моделирования термоэлектрических свойств нанокристаллической керамики с учётом мезоскопических эффектов, возникающих на границах зёрен. В основе работы программы лежит расчёт безразмерного параметра термоэлектрической эффективности ZT, который является ключевой характеристикой для оценки потенциала материала в термоэлектрических генераторах. Программа состоит из двух основных блоков: первый блок фокусируется на безразмерной модели, где параметры нормализуются относительно масштабов длины свободного пробега фононов и электронных носителей, а второй блок фокусируется на физически размерной модели, учитывающей реальные параметры наноматериала. Функция $ZT_$dimless реализует аналитическую модель, в которой электропроводность, термоэлектродвижущая сила и теплопроводность выражаются через безразмерные величины, связанные с относительными размерами зёрен d и высотой потенциальных барьеров на границах U. Такая модель позволяет описать зависимость термоэлектрических свойств от мезоструктуры материала, в частности, учитывая эффекты квантового туннелирования и электронного рассеяния на границах нанозёрен.

Следующая функция calculate$_ZT$ использует более реалистические физические константы, такие как число Лоренца, длины свободного пробега электронов и фононов, а также коэффициент отражения электронов на границах зёрен. Модель Маядаса-Шатцкеса применяется для описания уменьшения электрической проводимости в наноматериалах за счёт рассеяния электронов на границах зёрен. В данной функции учитываются два основных источника теплопроводности в виде электронной и фононной теплопроводности с использованием закона Видемана-Франца для электронной теплопроводности и модели Каллавея для оценки теплопроводности фононов с учётом рассеяния на границах зёрен. Важно, что электронная теплопроводность зависит от температуры, что моделируется через произведение электропроводности и температуры, нормированных на константу Лоренца.

После расчёта параметра термоэлектрической добротности ZT для двумерной сетки значений размера зёрен и температур программа визуализирует полученные данные с помощью трёх различных типов графиков. Двумерный график показывает зависимость ZT от размера зёрен для фиксированных температур, что позволяет проследить, как

изменяется эффективность материала при варьировании мезоструктуры. Контурный график предоставляет наглядное представление о распределении значений ZT в двумерном пространстве параметров «размер зёрен — температура», где цветовая гамма позволяет быстро оценить области с оптимальными термоэлектрическими свойствами. При этом линии контуров дополнительно снабжены числовыми метками, что делает график более информативным для количественного анализа. Трёхмерная поверхность визуализирует топологию параметра ZT в пространстве трёх переменных: размер зёрен, температура и значение ZT, позволяя оценить не только зависимости, но и пространственную структуру термоэлектрических свойств материала. Такой подход к визуализации помогает выявить оптимальные мезоструктурные параметры, при которых ZT достигает своих максимальных значений, что является критически важным для практического применения материала в термоэлектрических устройствах.

Программа, написанная на языке программирования Python, также содержит блок для генерации безразмерной модели, где параметры выражаются в относительных единицах, что позволяет выявить универсальные зависимости, не зависящие от конкретных физических констант. Такая безразмерная модель служит теоретической основой для понимания фундаментальных закономерностей термоэлектрических свойств наноматериалов и может быть использована для сравнения мезоскопических систем с разными масштабами. В целом, компьютерная программа предоставляет мощный инструмент для анализа и оптимизации термоэлектрических материалов на основе нанокерамики, учитывая как микроскопические, так и мезоскопические эффекты.

Результаты численных расчётов характеристик мезоскопических систем на основе нанокристаллической керамики

Визуализация результатов численных расчётов осуществляется с помощью функций `contourf`, `plot_surface` и `imshow` библиотеки Matplotlib. Например, зависимость $ZT\,(d,T)$ представляется в виде контурного графика с цветовой картой, где по осям отложены d и T, а цвет соответствует величине ZT. Аналогично строятся графики для $\sigma_{xx}\,(B,d)$, $N\,(B,d)$, $\alpha_{\text{opt}}\,(\omega,T)$ и других величин. Численное моделирование на основе разработанной программы позволило выявить ряд закономерностей в поведении мезоскопических керамических систем.

На рис. 2 изображён график функциональной зависимости термоэлектрической добротности ZT от размера зёрен D в нанокристаллической керамике мезоскопической системы при базовой электропроводности материала $\sigma_0 = 10^5\,\text{См/м}$, начальной коэффициенте Зеебека $S_0 = 200 \cdot 10^{-6}\,\text{В/К}$, начальной решёточной электропроводности $\kappa_{\ell 0} = 1.5\,\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$, длине свободного пробега электронов $10^{-8}\,\text{м}$, длине свободного пробега фононов $4 \cdot 10^{-8}\,\text{м}$.

На рис. 3 изображён контурный график зависимости термоэлектрической добротности ZT от размера зёрен D и температуры T в нанокристаллической керамике мезоскопической системы при базовой электропроводности материала $\sigma_0 = 10^5\,\text{См/м}$, начальной коэффициенте Зеебека $S_0 = 200 \cdot 10^{-6}\,\text{В/К}$, начальной решёточной электропроводности $\kappa_{\ell 0} = 1.5\,\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$, длине свободного пробега электронов $10^{-8}\,\text{м}$, длине свободного пробега фононов $4 \cdot 10^{-8}\,\text{м}$.

На рис. 4 изображена поверхность для зависимости термоэлектрической добротности ZT от размера зёрен D и температуры T в нанокристаллической керамике мезоскопической системы при базовой электропроводности материала $\sigma_0 = 10^5\,\text{См/м}$, начальной коэффициенте Зеебека $S_0 = 200 \cdot 10^{-6}\,\text{В/К}$, начальной решёточной электропроводности $\kappa_{\ell 0} = 1.5\,\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$, длине свободного пробега электронов $10^{-8}\,\text{м}$, длине свободного пробега фононов $4 \cdot 10^{-8}\,\text{м}$.

На рис. 5 изображена поверхность для зависимости термоэлектрической добротно-

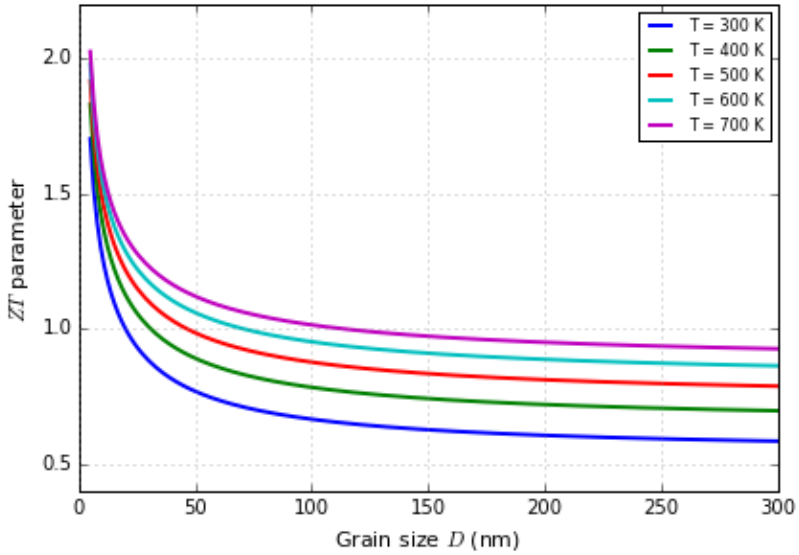


Рис. 2. Зависимость термоэлектрической добротности ZT от размера зёрен D в нанокристаллической керамике мезоскопической системы при базовой электропроводности материала $\sigma_0 = 10^5\,\text{См/м}$, начальной коэффициенте Зеебека $S_0 = 200 \cdot 10^{-6}\,\text{В/К}$, начальной решёточной электропроводности $\kappa_{\ell 0} = 1.5\,\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$, длине свободного пробега электронов $10^{-8}\,\text{м}$, длине свободного пробега фононов $4 \cdot 10^{-8}\,\text{м}$

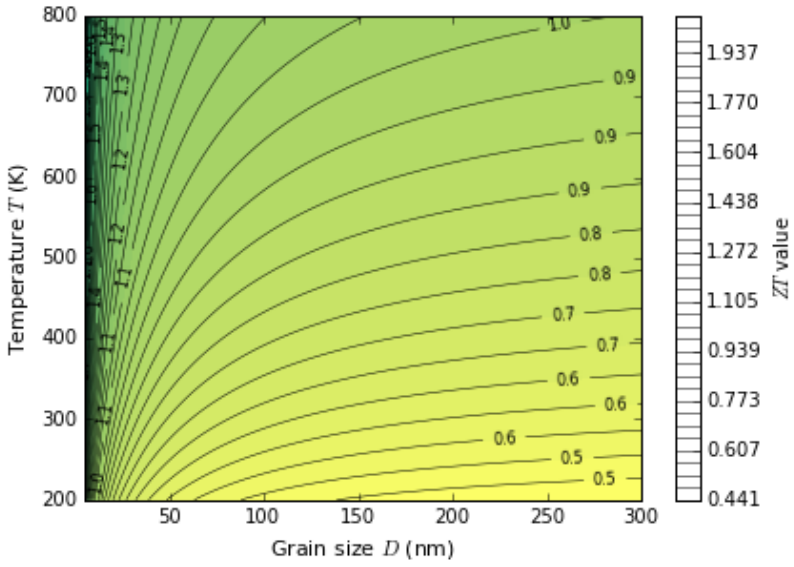


Рис. 3. Контурный график зависимости термоэлектрической добротности ZT от размера зёрен D и температуры T в нанокристаллической керамике мезоскопической системы при базовой электропроводности материала $\sigma_0 = 10^5\,\text{См/м}$, начальной коэффициенте Зеебека $S_0 = 200 \cdot 10^{-6}\,\text{В/К}$, начальной решёточной электропроводности $\kappa_{\ell 0} = 1.5\,\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$, длине свободного пробега электронов $10^{-8}\,\text{м}$, длине свободного пробега фононов $4 \cdot 10^{-8}\,\text{м}$

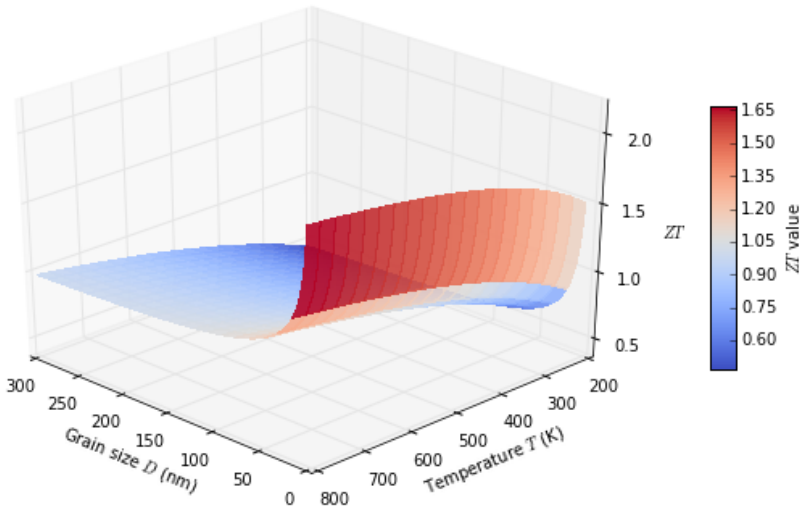


Рис. 4. Поверхность для зависимости термоэлектрической добротности ZT от размера зёрен D и температуры T в нанокристаллической керамике мезоскопической системы при базовой электропроводности материала $\sigma_0 = 10^5$ См/м, начальной коэффициенте Зеебека $S_0 = 200 \cdot 10^{-6}$ В/К, начальной решёточной электропроводности $\kappa_{\ell 0} = 1.5$ Вт/(м· К), длине свободного пробега электронов 10^{-8} м, длине свободного пробега фононов $4 \cdot 10^{-8}$ м

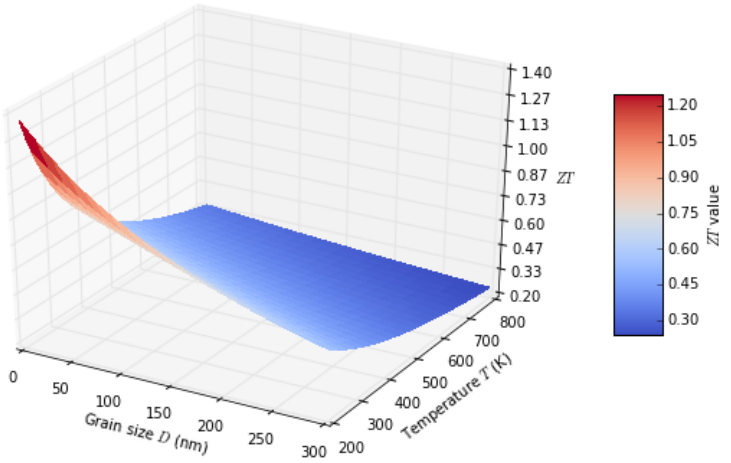


Рис. 5. Поверхность для зависимости термоэлектрической добротности ZT от размера зёрен D и температуры T в нанокристаллической керамике мезоскопической системы при высоте потенциального барьера $U = 0.1E_F$, относительной толщине потенциального барьера $\delta_r\delta/d = 0.01$, , длине свободного пробега фононов $1 \cdot 10^{-8}$ м, параметре рассеяния на дислокациях $B = 10^{-3}$ нм$^{-1}$

сти ZT от размера зёрен D и температуры T в нанокристаллической керамике мезоскопической системы при высоте потенциального барьера $U = 0.1E_F$, относительной толщине потенциального барьера $\delta_r\delta/d = 0.01$, , длине свободного пробега фононов $1 \cdot 10^{-8}$ м, параметре рассеяния на дислокациях $B = 10^{-3}$ нм$^{-1}$.

Зависимость параметра ZT от размера зёрен d имеет немонотонный характер с максимумом при некотором оптимальном размере d_{opt} 2. При больших d свойства материала приближаются к объёмным, и ZT определяется балансом $S^2\sigma$ и κ монокристалла. При уменьшении d сначала наблюдается рост ZT благодаря усилению рассеяния фононов на границах зёрен (уменьшение κ_ℓ), в то время как электронный транспорт ещё

не сильно подавлен. Однако при дальнейшем уменьшении d начинает доминировать рассеяние электронов на границах, что снижает σ, а также может уменьшаться S из-за квантового ограничения. Максимум ZT смещается в сторону меньших d при увеличении высоты барьера U, так как туннелирование становится менее эффективным и требуется большее количество границ для снижения κ_{ph}. Температурная зависимость ZT показывает рост с увеличением T в исследуемом диапазоне $300-800$ K, что связано с увеличением $S \propto T$ и уменьшением κ_{ph} из-за усиления рассеяния фононов на фононах. Оптимальные значения $ZT \sim 0.8-1.2$ достигаются при $d \approx 20-30$ нм, $U \approx 0.1-0.2E_F$, $T \approx 700-800$ K.

Разработанная программа на языке Python представляет собой эффективный инструмент для количественного анализа термоэлектрических свойств нанокристаллической керамики с учётом различных мезоскопических эффектов, что позволяет выявить закономерности, определяющие оптимальные параметры структуры мезоскопического материала для повышения энергетической эффективности термоэлектрических преобразователей. В основе подхода лежит двухуровневая теоретическая модель, объединяющая безразмерные и физически размерные формализмы, что обеспечивает как универсальность теоретического описания, так и применимость к реальным материалам. Безразмерная модель, реализованная в функции $ZT_$dimless, позволяет выделить фундаментальные зависимости термоэлектрической добротности ZT от относительных размеров зёрен и высоты потенциальных барьеров на границах, обусловленных мезоскопическим рассеянием электронов и фононов. Такой подход исключает влияние конкретных физических констант и выявляет общее поведение системы, что важно для сравнительного анализа различных наноматериалов.

Функция calculate$_ZT$ расширяет эту модель за счёт введения физически обоснованных параметров, таких как длина свободного пробега электронов и фононов, коэффициент отражения на границах зёрен и температура, что позволяет учитывать реальные условия работы термоэлектрических устройств. Применение модели Маядаса–Шатцкеса для описания электропроводности в наноматериалах демонстрирует значительное снижение проводимости при уменьшении размера зёрен, что обусловлено усиленным рассеянием носителей электрического заряда на межзёренных границах. Использование закона Видемана–Франца для электронной теплопроводности и модели Каллавея для фононного вклад показывает, как соотношение между этими двумя каналами теплопереноса зависит от температуры и мезоструктуры материала, что критически важно для оптимизации ZT. Особенно заметным является нелинейный характер зависимости фононной теплопроводности от размера зёрен, где уменьшение теплового потока при малых размерах зёрен компенсируется ростом электронной проводимости, что приводит к немонотонной зависимости ZT от структурных параметров. Визуализация результатов с помощью двумерных графиков, контурных карт и трёхмерных поверхностей позволяет наглядно интерпретировать полученные зависимости. Двумерные графики фиксированных температур демонстрируют наличие оптимального размера зёрен, при котором достигается максимум ZT, что обусловлено балансом между уменьшением теплопроводности и сохранением достаточного уровня электрической проводимости. Контурные графики выявляют области в пространстве «размер зёрен–температура», где термоэлектрическая эффективность максимальна, что особенно полезно для выбора режимов эксплуатации мезоскопического материала. Трёхмерные модели дают наиболее полное представление о топологии ZT, подчёркивая не только локальные экстремумы, но и тенденции, связанные с изменением температуры и структурных параметров. Это позволяет не только идентифицировать оптимальные условия, но и объяснить физические механизмы, лежащие в основе наблюдаемых эффектов, такие как квантовое туннелирование через межзёренные барьеры и температурная зависи-

мость подвижности носителей заряда.

Важным выводом является обнаружение нелинейной зависимости термоэлектрической добротности от размера зёрен и температуры, что указывает на необходимость комплексного подхода к оптимизации наноматериалов. Безразмерная модель подтверждает универсальность наблюдаемых эффектов, что позволяет переносить выводы на материалы с различными физическими константами, в то время как размерный анализ обеспечивает конкретные рекомендации для практического применения. В частности, программа показывает, что для достижения высоких значений термоэлектрической добротности ZT необходимо подбирать размер зёрен и рабочую температуру таким образом, чтобы минимизировать фононную теплопроводимость при сохранении высокой электронной проводимости, что может быть достигнуто за счёт управления мезоструктурой материала и введением легирующих добавок, изменяющих высоту потенциальных барьеров на границах. Таким образом, разработанный инструмент способствует пониманию фундаментальных процессов в нанокристаллических термоэлектриках.

Компьютерная программа для расчёта термоэлектрической добротности ZT нанокристаллической керамики с учётом мезоскопических эффектов может быть использована для ускорения научных исследований в области наноматериалов, сокращая время и стоимость экспериментальной подборки параметров (размеры зёрен, температура, легирование) благодаря предварительному моделированию. Компьютерная программа может быть использована для моделирования и анализа термоэлектрических свойств нанокристаллической керамики, в частности, для расчёта безразмерного параметра ZT, характеризующего эффективность термоэлектрического преобразования. Компьютерная программа позволяет исследовать влияние размера зерен и температуры на ZT, что может быть полезно для оптимизации термоэлектрических материалов. Результаты моделирования могут быть представлены в виде двумерных, контурных и трёхмерных графиков, что облегчает визуализацию и интерпретацию данных. Это может быть полезно в научных исследованиях и разработке новых термоэлектрических материалов и устройств. Кроме того, компьютерная программа может быть адаптирована для других аналогичных задач, связанных с моделированием физических свойств материалов. Программа для расчёта термоэлектрической добротности ZT нанокристаллической керамики с учётом мезоскопических эффектов может быть использована для дизайна гибридных систем с интеграцией термоэлектрических элементов в микроэлектронику (например, в сенсоры или микропроцессоры), где низкотемпературные источники тепла могут преобразовываться в электроэнергию для снижения энергопотребления. Программа для расчёта термоэлектрической добротности ZT нанокристаллической керамики с учётом мезоскопических эффектов может быть использована для анализа влияния дефектов и гранулометрического состава на стабильность работы термоэлектриков, что критично для долговечности устройств, эксплуатируемых в экстремальных условиях (высокие температуры, вибрации). Программа для расчёта термоэлектрической добротности ZT нанокристаллической керамики с учётом мезоскопических эффектов может быть использована для разработки адаптивных термоэлектрических устройств, способных автоматически подстраивать свою структуру (например, через саморегулируемую наноархитектуру) для работы в динамически меняющихся условиях (например, в аэрокосмической технике). Программа для расчёта термоэлектрической добротности ZT нанокристаллической керамики с учётом мезоскопических эффектов может быть использована для исследовательских приложений, включая виртуальные лаборатории для обучения студентов основам нанотехнологий.

Заключение

В работе проведено всестороннее теоретическое и численное исследование физических свойств мезоскопических систем на основе нанокристаллической керамики.

По результатам исследования можно сформулировать выводы:

1. анализ научных работ по мезоскопическим системам показал актуальность темы исследования,
2. разработанная модель, описывающая термоэлектрические, термомагнитные и термооптические явления с учётом квантово-размерных эффектов, рассеяния на границах зёрен и туннелирования через межзёренные барьеры, позволяет адекватно описывать физические процессы в мезоскопических системах на основе нанокристаллической керамики,
3. в результате численных расчётов построены графики зависимостей физических характеристик мезоскопических систем на основе нанокристаллической керамики и показано, что параметры переноса существенно зависят от размера нанокристаллитов, концентрации дефектов и температуры.

Мезоскопические системы на основе нанокристаллической керамики демонстрируют уникальные термоэлектрические свойства, обусловленные взаимодействием квантовых размерных эффектов и граничных явлений. Эффект Зеебека в таких системах определяется модифицированной плотностью состояний и подвижностью носителей, что приводит к нестандартной зависимости коэффициента Зеебека от температуры, размера зёрен и внешних полей. Эффект Пельтье также испытывает существенные изменения из-за рассеяния на границах зёрен и фононных эффектов, что требует учёта дополнительных вкладов в тепловые потоки. Здесь обобщены основные аспекты физических эффектов Зеебека и Пельтье в мезоскопических системах на основе нанокристаллической керамики, с акцентом на аналитическое описание и роли границ зёрен, размерных эффектов и внешних полей. Представленные формулы позволяют оценивать термоэлектрические свойства таких систем и прогнозировать их поведение при изменении морфологии и внешних условий. Дальнейшее развитие теории требует учёта нелинейных эффектов, спин-орбитального взаимодействия и взаимодействия электронов с магнонами в магнитных нанокристаллических структурах. Аналитические выражения, представленные выше, позволяют описать термоэлектрические свойства мезоскопических систем на основе нанокристаллической керамики и прогнозировать их поведение при изменении морфологических и внешних параметров.

Гипотеза научного исследования, заключающаяся в том, что процесс прогнозирования физических свойств мезоскопических систем на основе нанокристаллической керамики будет возможен при условии построения теоретической модели физических процессов в мезоскопических системах и проведении численных расчётов физических характеристик мезоскопических систем на основе нанокристаллической керамики, подтверждена полностью.

Теоретические и численные результаты могут быть использованы в курсах теоретической физики в педагогическом университете. Результаты численных расчётов могут быть использованы для дальнейшего развития и модификации теории физических свойств мезоскопических системах на основе нанокристаллической керамики.

Благодарности

Авторы благодарят профессора Шубовича В. Г. за полезные обсуждения и критические замечания.

Список использованных источников

1. Perspectives toward damage-tolerant nanostructure ceramics / Meicen Fan [et al.] // Advanced science. — 2024. — Apr. — Vol. 11, no. 24. — URL: http://dx.doi.org/10.1002/advs.202309834.

2. Ultralarge elastic deformation of nanoscale diamond / Amit Banerjee [et al.] // Science. — 2018. — Apr. — Vol. 360, no. 6386. — P. 300–302. — URL: http://dx.doi.org/10.1126/science.aar4165.

3. Modern inorganic aerogels / Christoph Ziegler [et al.] // Angewandte chemie international edition. — 2017. — Sept. — Vol. 56, no. 43. — P. 13200–13221. — URL: http://dx.doi.org/10.1002/anie.201611552.

4. Fabrication and deformation of three-dimensional hollow ceramic nanostructures / Dongchan Jang [et al.] // Nature materials. — 2013. — Sept. — Vol. 12, no. 10. — P. 893–898. — URL: http://dx.doi.org/10.1038/nmat3738.

5. A robust hierarchical MXene/Ni/Aluminosilicate glass composite for high-performance microwave absorption / Wei Luo [et al.] // Advanced Science. — 2021. — Dec. — Vol. 9, no. 4. — URL: http://dx.doi.org/10.1002/advs.202104163.

6. Pressureless glass crystallization of transparent yttrium aluminum garnet-based nanoceramics / Xiaoguang Ma [et al.] // Nature communications. — 2018. — Mar. — Vol. 9, no. 1. — URL: http://dx.doi.org/10.1038/s41467-018-03467-7.

7. Ultralight, recoverable, and high-temperature-resistant SiC nanowire aerogel / Lei Su [et al.] // ACS Nano. — 2018. — Mar. — Vol. 12, no. 4. — P. 3103–3111. — URL: http://dx.doi.org/10.1021/acsnano.7b08577.

8. Sintering and densification of nanocrystalline ceramic oxide powders: a review / R. Chaim [et al.] // Advances in applied ceramics. — 2008. — May. — Vol. 107, no. 3. — P. 159–169. — URL: http://dx.doi.org/10.1179/174367508X297812.

9. Kumar Kundan, Chowdhury Anirban. Reviewing the cases of nanoscale heterogeneity in ceramics: boon or bane? // Materialia. — 2021. — May. — Vol. 16. — P. 101109. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.mtla.2021.101109.

10. Shear banding mechanism in compressed nanocrystalline ceramic nanopillars / Haw-Wen Hsiao [et al.] // Physical review materials. — 2019. — Aug. — Vol. 3, no. 8. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.3.083601.

11. Hsueh C. H., Becher P. F. Effects of dopant segregation on lattice-diffusional creep of nanocrystalline ceramics // Physical Review B. — 2005. — Jan. — Vol. 71, no. 1. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.71.014115.

12. Defect studies of nanocrystalline zirconia powders and sintered ceramics / Jakub Cizek [et al.] // Physical Review B. — 2010. — Jan. — Vol. 81, no. 2. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.81.024116.

13. Ovid'ko I. A., Sheinerman A. G. Nanocrack generation at dislocation-disclination configurations in nanocrystalline metals and ceramics // Physical Review B. — 2008. — Feb. — Vol. 77, no. 5. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.77.054109.

14. Grain-size effects on the ferroelectric behavior of dense nanocrystalline $BaTiO_3$ ceramics / Zhe Zhao [et al.] // Physical Review B. — 2004. — July. — Vol. 70, no. 2. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.70.024107.

15. High dielectric constant and frozen macroscopic polarization in dense nanocrystalline $BaTiO_3$ ceramics / Maria Teresa Buscaglia [et al.] // Physical Review B. — 2006. — Feb. — Vol. 73, no. 6. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.73.064114.

16. Grain boundary sliding and amorphization are responsible for the reverse Hall-Petch relation in superhard nanocrystalline boron carbide / Dezhou Guo [et al.] // Physical Review Letters. — 2018. — Oct. — Vol. 121, no. 14. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.121.145504.

17. Zare Chavoshi Saeed, Branicio Paulo S., An Qi. Transition between Hall-Petch and inverse Hall-Petch behavior in nanocrystalline silicon carbide // Physical Review Materials. — 2021. — July. — Vol. 5, no. 7. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.5.073606.

18. Model of high-temperature plastic deformation of nanocrystalline materials: application to yttria tetragonal zirconia / D. Gomez-Garcia [et al.] // Physical Review B. — 2003. — Apr. — Vol. 67, no. 14. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.67.144101.

19. Bobylev S. V., Morozov N. F., Ovid'ko I. A. Cooperative grain boundary sliding and migration process in nanocrystalline solids // Physical Review Letters. — 2010. — July. — Vol. 105, no. 5. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.105.055504.

20. Liang Aoyan, Liu Chang, Branicio Paulo S. Hot-press sintering of aluminum nitride nanoceramics // Physical review materials. — 2021. — Sept. — Vol. 5, no. 9. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.5.096001.

21. Ionic conductivity of nanocrystalline yttria-stabilized zirconia: grain boundary and size effects / O. J. Dura [et al.] // Physical Review B. — 2010. — May. — Vol. 81, no. 18. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.81.184301.

22. Embrittlement of metal by solute segregation-induced amorphization / Hsiu-Pin Chen [et al.] // Physical Review Letters. — 2010. — Apr. — Vol. 104, no. 15. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.104.155502.

23. Demkowicz Michael J., Argon Ali S. Liquidlike atomic environments act as plasticity carriers in amorphous silicon // Physical Review B. — 2005. — Dec. — Vol. 72, no. 24. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.72.245205.

24. Production and qualification of an electrospun ceramic nanofiber material as a candidate future high power target / Sujit Bidhar [et al.] // Physical review accelerators and beams. — 2021. — Dec. — Vol. 24, no. 12. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.24.123001.

25. Szlufarska Izabela, Nakano Aiichiro, Vashishta Priya. A crossover in the mechanical response of nanocrystalline ceramics // Science. — 2005. — Aug. — Vol. 309, no. 5736. — P. 911–914. — URL: http://dx.doi.org/10.1126/science.1114411.

26. Mayo M. J. Synthesis and applications of nanocrystalline ceramics // Materials and design. — 1993. — Jan. — Vol. 14, no. 6. — P. 323–329. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/0261-3069(93)90106-6.

27. Palmero Paola. Structural ceramic nanocomposites: a review of properties and powders' synthesis methods // Nanomaterials. — 2015. — Apr. — Vol. 5, no. 2. — P. 656–696. — URL: http://dx.doi.org/10.3390/nano5020656.

28. Sintering dense nanocrystalline 3YSZ ceramics without grain growth by plastic deformation as dominating mechanism / Wei Ji [et al.] // Ceramics international. — 2019. — May. — Vol. 45, no. 7. — P. 9363–9367. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.07.228.

29. Extraordinary high-temperature mechanical properties in binder-free nanopolycrystalline WC ceramic / Hongfeng Dong [et al.] // Journal of materials science and technology. — 2022. — Jan. — Vol. 97. — P. 169–175. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.jmst.2021.05.013.

30. Ovid'ko I. A. Micromechanics of fracturing in nanoceramics // Philosophical transactions of the Royal Society A: mathematical, physical and engineering sciences. — 2015. — Mar. — Vol. 373, no. 2038. — P. 20140129. — URL: http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2014.0129.

31. Kuwabara Makoto. Innovative nanocrystal-based technologies for ceramic devices with novel electronic functions // Journal of advanced ceramics. — 2012. — June. — Vol. 1, no. 2. — P. 79–88. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/s40145-012-0016-y.

32. Broadband electromagnetic wave tunneling with transmuted material singularity / Yichao Liu [et al.] // Physical Review Letters. — 2020. — nov. — Vol. 125, no. 20. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevlett.125.207401.

33. Zhu Yuntian T. Deformation mechanisms of nanocrystalline materials // Materials science forum. — 2007. — Mar. — Vol. 539-543. — P. 270–277. — URL: http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.539-543.270.

34. Formation of nanocrystalline surface layers in various metallic materials by near surface severe plastic deformation / Masahide Sato [et al.] // Science and technology of advanced materials. — 2004. — Jan. — Vol. 5, no. 1-2. — P. 145–152. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.stam.2003.10.015.

35. Intrinsic versus extrinsic effects of the grain boundary on the properties of ferroelectric nanoceramics / Yu Su [et al.] // Physical Review B. — 2017. — Feb. — Vol. 95, no. 5. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.95.054121.

36. Effect of grain size on the electrocaloric properties of polycrystalline ferroelectrics / Xu Hou [et al.] // Physical Review Applied. — 2021. — May. — Vol. 15, no. 5. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevApplied.15.054019.

37. Cao Kai-Qi, Zhang Guo-Hua. Fabrication of high-performance nanocrystalline-structured glass-ceramics from coal fly ash // Ceramics International. — 2025. — Oct. — Vol. 51, no. 25. — P. 45161–45169. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.07.234.

38. Grain size dependent indentation size effect and deformation mechanism in Y2O3 nanocrystalline ceramics / Haomin Wang [et al.] // Acta Materialia. — 2025. — June. — Vol. 292. — P. 121077. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2025.121077.

39. Heat transfer, crystallization and properties of Bayan Obo tailings-based nanocrystalline glass-ceramics processed with microwave radiation / Qingwei Bai [et al.] // Materials Today Communications. — 2024. — Mar. — Vol. 38. — P. 108005. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.108005.

40. Increase of specific interfacial coherence in nanocrystalline ceramic-metal composites / Maobao Xu [et al.] // Composites Part B: Engineering. — 2023. — Aug. — Vol. 263. — P. 110873. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.110873.

41. Gilman J. J., Johnston W. G. Observations of dislocation glide and climb in lithium fluoride crystals // Journal of Applied Physics. — 1956. — Sept. — Vol. 27, no. 9. — P. 1018–1022. — URL: http://dx.doi.org/10.1063/1.1722532.

42. Conducting nanowires in insulating ceramics / Atsutomo Nakamura [et al.] // Nature materials. — 2003. — June. — Vol. 2, no. 7. — P. 453–456. — URL: http://dx.doi.org/10.1038/nmat920.

43. Ikuhara Yuichi. Nanowire design by dislocation technology // Progress in materials science. — 2009. — Aug. — Vol. 54, no. 6. — P. 770–791. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.pmatsci.2009.03.001.

44. Fang Xufei. Mechanical tailoring of dislocations in ceramics at room temperature: A perspective // Journal of the American Ceramic Society. — 2023. — Aug. — Vol. 107, no. 3. — P. 1425–1447. — URL: http://dx.doi.org/10.1111/jace.19362.

45. Control of polarization in bulk ferroelectrics by mechanical dislocation imprint / Marion Hofling [et al.] // Science. — 2021. — May. — Vol. 372, no. 6545. — P. 961–964. — URL: http://dx.doi.org/10.1126/science.abe3810.

46. Dislocation-enhanced electrical conductivity in rutile TiO2 accessed by room-temperature nanoindentation / Hanna Bishara [et al.] // Scripta materialia. — 2022. — Apr. — Vol. 212. — P. 114543. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.scriptamat.2022.114543.

47. Oshima Yu, Nakamura Atsutomo, Matsunaga Katsuyuki. Extraordinary plasticity of an inorganic semiconductor in darkness // Science. — 2018. — May. — Vol. 360, no. 6390. — P. 772–774. — URL: http://dx.doi.org/10.1126/science.aar6035.

48. Li Xiaocui, Chen Fu-Rong, Lu Yang. Ductile inorganic semiconductors for deformable electronics // Interdisciplinary Materials. — 2024. — Aug. — Vol. 3, no. 6. — P. 835–846. — URL: http://dx.doi.org/10.1002/idm2.12209.

49. Multiferroicity in plastically deformed SrTiO3 / Xi Wang [et al.] // Nature communications. — 2024. — Aug. — Vol. 15, no. 1. — URL: http://dx.doi.org/10.1038/s41467-024-51615-z.

50. Man-made diamonds / F. P. Bundy [et al.] // Nature. — 1955. — July. — Vol. 176, no. 4471. — P. 51–55. — URL: http://dx.doi.org/10.1038/176051a0.

51. Wentorf R. H. Cubic form of boron nitride // The Journal of chemical physics. — 1957. — Apr. — Vol. 26, no. 4. — P. 956–956. — URL: http://dx.doi.org/10.1063/1.1745964.

52. Wentorf R. H., DeVries R. C., Bundy F. P. Sintered superhard materials // Science. — 1980. — May. — Vol. 208, no. 4446. — P. 873–880. — URL: http://dx.doi.org/10.1126/science.208.4446.873.

53. Liew W. Y. H., Yuan S., Ngoi B. K. A. Evaluation of machining performance of STAVAX with PCBN tools // The International journal of advanced manufacturing technology. — 2004. — Jan. — Vol. 23, no. 1-2. — P. 11–19. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/s00170-002-1520-y.

54. Solozhenko Vladimir L., Kurakevych Oleksandr O., Le Godec Yann. Creation of nanostuctures by extreme conditions: high-pressure synthesis of ultrahard nanocrystalline cubic boron nitride // Advanced materials. — 2012. — Feb. — Vol. 24, no. 12. — P. 1540–1544. — URL: http://dx.doi.org/10.1002/adma.201104361.

55. Ultrahard nanotwinned cubic boron nitride / Yongjun Tian [et al.] // Nature. — 2013. — Jan. — Vol. 493, no. 7432. — P. 385–388. — URL: http://dx.doi.org/10.1038/nature11728.

56. Ultrananocrystalline diamond thin films for MEMS and moving mechanical assembly devices / A. R. Krauss [et al.] // Diamond and Related Materials. — 2001. — Nov. — Vol. 10, no. 11. — P. 1952–1961. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/S0925-9635(01)00385-5.

57. Dynamic indentation response of fine-grained boron carbide / Dipankar Ghosh [et al.] // Journal of the American Ceramic Society. — 2007. — June. — Vol. 90, no. 6. — P. 1850–1857. — URL: http://dx.doi.org/10.1111/j.1551-2916.2007.01652.x.

58. Characterization of hardness, elastic modulus and fracture toughness of RB-SiC ceramics at elevated temperature by Vickers test / Xiaoshuang Rao [et al.] // Materials science and engineering: A. — 2019. — Jan. — Vol. 744. — P. 426–435. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2018.12.044.

59. Mechanical characterization of fine grained silicon carbide consolidated using polymer pyrolysis and spark plasma sintering / Arif Rahman [et al.] // Ceramics International. — 2014. — Sept. — Vol. 40, no. 8. — P. 12081–12091. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.04.048.

60. Microstructure and mechanical properties of boron carbide thin films / Zenghu Han [et al.] // Materials letters. — 2002. — Dec. — Vol. 57, no. 4. — P. 899–903. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/S0167-577X(02)00892-3.

61. Superhard nanocrystalline silicon carbide films / Feng Liao [et al.] // Applied physics letters. — 2005. — Apr. — Vol. 86, no. 17. — URL: http://dx.doi.org/10.1063/1.1920434.

62. Thevenot Francois. Boron carbide - a comprehensive review // Journal of the European ceramic society. — 1990. — Jan. — Vol. 6, no. 4. — P. 205–225. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/0955-2219(90)90048-K.

63. Advances in silicon carbide science and technology at the micro- and nanoscales / Roya Maboudian [et al.] // Journal of vacuum science and technology A: vacuum, surfaces, and films. — 2013. — June. — Vol. 31, no. 5. — URL: http://dx.doi.org/10.1116/1.4807902.

64. Koyanagi Takaaki, Katoh Yutai, Nozawa Takashi. Design and strategy for next-generation silicon carbide composites for nuclear energy // Journal of nuclear materials. — 2020. — Nov. — Vol. 540. — P. 152375. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.jnucmat.2020.152375.

65. An Qi, Goddard William A., Cheng Tao. Atomistic explanation of shear-induced amorphous band formation in boron carbide // Physical Review Letters. — 2014. — Aug. — Vol. 113, no. 9. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.113.095501.

66. Atomic structure of amorphous shear bands in boron carbide / K. Madhav Reddy [et al.] // Nature communications. — 2013. — Sept. — Vol. 4, no. 1. — URL: http://dx.doi.org/10.1038/ncomms3483.

67. Chen Mingwei, McCauley James W., Hemker Kevin J. Shock-induced localized amorphization in boron carbide // Science. — 2003. — Mar. — Vol. 299, no. 5612. — P. 1563–1566. — URL: http://dx.doi.org/10.1126/science.1080819.

68. Grady D. E. Shock-wave compression of brittle solids // Mechanics of materials. — 1998. — Aug. — Vol. 29, no. 3-4. — P. 181–203. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/S0167-6636(98)00015-5.

69. Evans Anthony G. Perspective on the development of high-toughness ceramics // Journal of the American ceramic society. — 1990. — Feb. — Vol. 73, no. 2. — P. 187–206. — URL: http://dx.doi.org/10.1111/j.1151-2916.1990.tb06493.x.

70. Vogler T. J., Reinhart W. D., Chhabildas L. C. Dynamic behavior of boron carbide // Journal of applied physics. — 2004. — Apr. — Vol. 95, no. 8. — P. 4173–4183. — URL: http://dx.doi.org/10.1063/1.1686902.

71. Ritchie Robert O. The conflicts between strength and toughness // Nature materials. — 2011. — Oct. — Vol. 10, no. 11. — P. 817–822. — URL: http://dx.doi.org/10.1038/nmat3115.

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

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

E-mail: ms.zinaida.tolyanina@yandex.ru
ORCID iD 0000-0003-2937-3889
Web of Science ResearcherID HMV-0830-2023

Original article
PACS 65.40.-b
OCIS 160.4236
MSC 78A25

Investigation of physical properties of mesoscopic systems based on nanocrystalline ceramics

K. K. Altunin, Z. A. Tolyanina

Ulyanovsk State Pedagogical University, 432071, Ulyanovsk, Russia

Submitted May 10, 2026
Resubmitted May 12, 2026
Published June 30, 2026

Abstract. The physical properties of mesoscopic systems based on nanocrystalline ceramics are examined. A theoretical model of thermoelectric processes in mesoscopic systems based on nanocrystalline ceramics is developed. A computer program for describing thermoelectric processes in mesoscopic systems based on nanocrystalline ceramics is developed. Numerical calculations of the thermoelectric figure of merit of mesoscopic systems based on nanocrystalline ceramics are performed.

Keywords: nanocrystalline ceramics, mesoscopic system, thermoelectric figure of merit, theoretical model of thermoelectric processes, nanocrystallite

Acknowledgments

The authors thank Professor V. G. Shubovich for helpful discussions and critical comments.

References

1. Perspectives toward damage-tolerant nanostructure ceramics / Meicen Fan [et al.] // Advanced science. — 2024. — Apr. — Vol. 11, no. 24. — URL: http://dx.doi.org/10.1002/advs.202309834.

2. Ultralarge elastic deformation of nanoscale diamond / Amit Banerjee [et al.] // Science. — 2018. — Apr. — Vol. 360, no. 6386. — P. 300–302. — URL: http://dx.doi.org/10.1126/science.aar4165.

3. Modern inorganic aerogels / Christoph Ziegler [et al.] // Angewandte chemie international edition. — 2017. — Sept. — Vol. 56, no. 43. — P. 13200–13221. — URL: http://dx.doi.org/10.1002/anie.201611552.

4. Fabrication and deformation of three-dimensional hollow ceramic nanostructures / Dongchan Jang [et al.] // Nature materials. — 2013. — Sept. — Vol. 12, no. 10. — P. 893–898. — URL: http://dx.doi.org/10.1038/nmat3738.

5. A robust hierarchical MXene/Ni/Aluminosilicate glass composite for high-performance microwave absorption / Wei Luo [et al.] // Advanced Science. — 2021. — Dec. — Vol. 9, no. 4. — URL: http://dx.doi.org/10.1002/advs.202104163.

6. Pressureless glass crystallization of transparent yttrium aluminum garnet-based nanoceramics / Xiaoguang Ma [et al.] // Nature communications. — 2018. — Mar. — Vol. 9, no. 1. — URL: http://dx.doi.org/10.1038/s41467-018-03467-7.

7. Ultralight, recoverable, and high-temperature-resistant SiC nanowire aerogel / Lei Su [et al.] // ACS Nano. — 2018. — Mar. — Vol. 12, no. 4. — P. 3103–3111. — URL: http://dx.doi.org/10.1021/acsnano.7b08577.

8. Sintering and densification of nanocrystalline ceramic oxide powders: a review / R. Chaim [et al.] // Advances in applied ceramics. — 2008. — May. — Vol. 107, no. 3. — P. 159–169. — URL: http://dx.doi.org/10.1179/174367508X297812.

9. Kumar Kundan, Chowdhury Anirban. Reviewing the cases of nanoscale heterogeneity in ceramics: boon or bane? // Materialia. — 2021. — May. — Vol. 16. — P. 101109. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.mtla.2021.101109.

10. Shear banding mechanism in compressed nanocrystalline ceramic nanopillars / Haw-Wen Hsiao [et al.] // Physical review materials. — 2019. — Aug. — Vol. 3, no. 8. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.3.083601.

11. Hsueh C. H., Becher P. F. Effects of dopant segregation on lattice-diffusional creep of nanocrystalline ceramics // Physical Review B. — 2005. — Jan. — Vol. 71, no. 1. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.71.014115.

12. Defect studies of nanocrystalline zirconia powders and sintered ceramics / Jakub Cizek [et al.] // Physical Review B. — 2010. — Jan. — Vol. 81, no. 2. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.81.024116.

13. Ovid'ko I. A., Sheinerman A. G. Nanocrack generation at dislocation-disclination configurations in nanocrystalline metals and ceramics // Physical Review B. — 2008. — Feb. — Vol. 77, no. 5. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.77.054109.

14. Grain-size effects on the ferroelectric behavior of dense nanocrystalline $BaTiO_3$ ceramics / Zhe Zhao [et al.] // Physical Review B. — 2004. — July. — Vol. 70, no. 2. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.70.024107.

15. High dielectric constant and frozen macroscopic polarization in dense nanocrystalline $BaTiO_3$ ceramics / Maria Teresa Buscaglia [et al.] // Physical Review B. — 2006. — Feb. — Vol. 73, no. 6. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.73.064114.

16. Grain boundary sliding and amorphization are responsible for the reverse Hall-Petch relation in superhard nanocrystalline boron carbide / Dezhou Guo [et al.] // Physical Review Letters. — 2018. — Oct. — Vol. 121, no. 14. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.121.145504.

17. Zare Chavoshi Saeed, Branicio Paulo S., An Qi. Transition between Hall-Petch and inverse Hall-Petch behavior in nanocrystalline silicon carbide // Physical Review Materials. — 2021. — July. — Vol. 5, no. 7. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.5.073606.

18. Model of high-temperature plastic deformation of nanocrystalline materials: application to yttria tetragonal zirconia / D. Gomez-Garcia [et al.] // Physical Review B. — 2003. — Apr. — Vol. 67, no. 14. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.67.144101.

19. Bobylev S. V., Morozov N. F., Ovid'ko I. A. Cooperative grain boundary sliding and migration process in nanocrystalline solids // Physical Review Letters. — 2010. — July. — Vol. 105, no. 5. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.105.055504.

20. Liang Aoyan, Liu Chang, Branicio Paulo S. Hot-press sintering of aluminum nitride nanoceramics // Physical review materials. — 2021. — Sept. — Vol. 5, no. 9. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.5.096001.

21. Ionic conductivity of nanocrystalline yttria-stabilized zirconia: grain boundary and size effects / O. J. Dura [et al.] // Physical Review B. — 2010. — May. — Vol. 81, no. 18. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.81.184301.

22. Embrittlement of metal by solute segregation-induced amorphization / Hsiu-Pin Chen [et al.] // Physical Review Letters. — 2010. — Apr. — Vol. 104, no. 15. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.104.155502.

23. Demkowicz Michael J., Argon Ali S. Liquidlike atomic environments act as plasticity carriers in amorphous silicon // Physical Review B. — 2005. — Dec. — Vol. 72, no. 24. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.72.245205.

24. Production and qualification of an electrospun ceramic nanofiber material as a candidate future high power target / Sujit Bidhar [et al.] // Physical review accelerators and beams. — 2021. — Dec. — Vol. 24, no. 12. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.24.123001.

25. Tunable third-order nonlinear optical response in ε-near-zero multilayer metamaterials / Domenico Genchi [et al.] // Physical Review Applied. — 2021. — dec. — Vol. 16, no. 6. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevapplied.16.064020.

26. Broadband electromagnetic wave tunneling with transmuted material singularity / Yichao Liu [et al.] // Physical Review Letters. — 2020. — nov. — Vol. 125, no. 20. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevlett.125.207401.

27. Polaritonic cylinders as multifunctional metamaterials: Single scattering and effective medium description / Charalampos P. Mavidis [et al.] // Physical Review B. — 2020. — oct. — Vol. 102, no. 15. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.102.155310.

28. Electrodynamics of conductive oxides: intensity-dependent anisotropy, reconstruction of the effective dielectric constant, and harmonic generation / Michael Scalora [et al.] // Physical Review A. — 2020. — may. — Vol. 101, no. 5. — URL: https://doi.org/10.1103/physreva.101.053828.

29. Kim Jungmin, Yu Sunkyu, Park Namkyoo. Universal design platform for an extended class of photonic Dirac cones // Physical Review Applied. — 2020. — apr. — Vol. 13, no. 4. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevapplied.13.044015.

30. Extended Drude model for intraband-transition-induced optical nonlinearity / Heng Wang [et al.] // Physical Review Applied. — 2019. — jun. — Vol. 11, no. 6. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevapplied.11.064062.

31. Realization of a magneto-optical near-zero index medium by an unpaired Dirac point / Xin Zhou [et al.] // Physical Review B. — 2018. — nov. — Vol. 98, no. 20. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.98.205115.

32. Full utilization of semi-Dirac cones in photonics / Utku G. Yasa [et al.] // Physical Review B. — 2018. — may. — Vol. 97, no. 19. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevb.97.195131.

33. Optical time reversal from time-dependent epsilon-near-zero media / Stefano Vezzoli [et al.] // Physical Review Letters. — 2018. — jan. — Vol. 120, no. 4. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevlett.120.043902.

34. Pendry J. B. Time reversal and negative refraction // Science. — 2008. — oct. — Vol. 322, no. 5898. — P. 71–73. — URL: https://doi.org/10.1126/science.1162087.

35. Epsilon-near-zero substrate engineering for ultrathin-film perfect absorbers / Jura Rensberg [et al.] // Physical Review Applied. — 2017. — jul. — Vol. 8, no. 1. — URL: https://doi.org/10.1103/physrevapplied.8.014009.

36. Optical bound states in the continuum in a single slab with zero refractive index / LiangSheng Li [et al.] // Physical Review A. — 2017. — jul. — Vol. 96, no. 1. — URL: https://doi.org/10.1103/physreva.96.013801.

37. Szlufarska Izabela, Nakano Aiichiro, Vashishta Priya. A crossover in the mechanical response of nanocrystalline ceramics // Science. — 2005. — Aug. — Vol. 309, no. 5736. — P. 911–914. — URL: http://dx.doi.org/10.1126/science.1114411.

38. Mayo M. J. Synthesis and applications of nanocrystalline ceramics // Materials and design. — 1993. — Jan. — Vol. 14, no. 6. — P. 323–329. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/0261-3069(93)90106-6.

39. Ovid'ko I. A. Micromechanics of fracturing in nanoceramics // Philosophical transactions of the Royal Society A: mathematical, physical and engineering sciences. — 2015. — Mar. — Vol. 373, no. 2038. — P. 20140129. — URL: http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2014.0129.

40. Palmero Paola. Structural ceramic nanocomposites: a review of properties and powders' synthesis methods // Nanomaterials. — 2015. — Apr. — Vol. 5, no. 2. — P. 656–696. — URL: http://dx.doi.org/10.3390/nano5020656.

41. Zhu Yuntian T. Deformation mechanisms of nanocrystalline materials // Materials science forum. — 2007. — Mar. — Vol. 539-543. — P. 270–277. — URL: http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.539-543.270.

42. Extraordinary high-temperature mechanical properties in binder-free nanopolycrystalline WC ceramic / Hongfeng Dong [et al.] // Journal of materials science and technology. — 2022. — Jan. — Vol. 97. — P. 169–175. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.jmst.2021.05.013.

43. Kuwabara Makoto. Innovative nanocrystal-based technologies for ceramic devices with novel electronic functions // Journal of advanced ceramics. — 2012. — June. — Vol. 1, no. 2. — P. 79–88. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/s40145-012-0016-y.

44. Sintering dense nanocrystalline 3YSZ ceramics without grain growth by plastic deformation as dominating mechanism / Wei Ji [et al.] // Ceramics international. — 2019. — May. — Vol. 45, no. 7. — P. 9363–9367. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.07.228.

45. Formation of nanocrystalline surface layers in various metallic materials by near surface severe plastic deformation / Masahide Sato [et al.] // Science and technology of advanced materials. — 2004. — Jan. — Vol. 5, no. 1-2. — P. 145–152. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.stam.2003.10.015.

46. Intrinsic versus extrinsic effects of the grain boundary on the properties of ferroelectric nanoceramics / Yu Su [et al.] // Physical Review B. — 2017. — Feb. — Vol. 95, no. 5. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.95.054121.

47. Effect of grain size on the electrocaloric properties of polycrystalline ferroelectrics / Xu Hou [et al.] // Physical Review Applied. — 2021. — May. — Vol. 15, no. 5. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevApplied.15.054019.

48. Cao Kai-Qi, Zhang Guo-Hua. Fabrication of high-performance nanocrystalline-structured glass-ceramics from coal fly ash // Ceramics International. — 2025. — Oct. — Vol. 51, no. 25. — P. 45161–45169. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.07.234.

49. Grain size dependent indentation size effect and deformation mechanism in Y2O3 nanocrystalline ceramics / Haomin Wang [et al.] // Acta Materialia. — 2025. — June. — Vol. 292. — P. 121077. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2025.121077.

50. Heat transfer, crystallization and properties of Bayan Obo tailings-based nanocrystalline glass-ceramics processed with microwave radiation / Qingwei Bai [et al.] // Materials Today Communications. — 2024. — Mar. — Vol. 38. — P. 108005. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.108005.

51. Increase of specific interfacial coherence in nanocrystalline ceramic-metal composites / Maobao Xu [et al.] // Composites Part B: Engineering. — 2023. — Aug. — Vol. 263. — P. 110873. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2023.110873.

52. Gilman J. J., Johnston W. G. Observations of dislocation glide and climb in lithium fluoride crystals // Journal of Applied Physics. — 1956. — Sept. — Vol. 27, no. 9. — P. 1018–1022. — URL: http://dx.doi.org/10.1063/1.1722532.

53. Conducting nanowires in insulating ceramics / Atsutomo Nakamura [et al.] // Nature materials. — 2003. — June. — Vol. 2, no. 7. — P. 453–456. — URL: http://dx.doi.org/10.1038/nmat920.

54. Ikuhara Yuichi. Nanowire design by dislocation technology // Progress in materials science. — 2009. — Aug. — Vol. 54, no. 6. — P. 770–791. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.pmatsci.2009.03.001.

55. Fang Xufei. Mechanical tailoring of dislocations in ceramics at room temperature: A perspective // Journal of the American Ceramic Society. — 2023. — Aug. — Vol. 107, no. 3. — P. 1425–1447. — URL: http://dx.doi.org/10.1111/jace.19362.

56. Control of polarization in bulk ferroelectrics by mechanical dislocation imprint / Marion Hofling [et al.] // Science. — 2021. — May. — Vol. 372, no. 6545. — P. 961–964. — URL: http://dx.doi.org/10.1126/science.abe3810.

57. Dislocation-enhanced electrical conductivity in rutile TiO2 accessed by room-temperature nanoindentation / Hanna Bishara [et al.] // Scripta materialia. — 2022. — Apr. — Vol. 212. — P. 114543. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.scriptamat.2022.114543.

58. Oshima Yu, Nakamura Atsutomo, Matsunaga Katsuyuki. Extraordinary plasticity of an inorganic semiconductor in darkness // Science. — 2018. — May. — Vol. 360, no. 6390. — P. 772–774. — URL: http://dx.doi.org/10.1126/science.aar6035.

59. Li Xiaocui, Chen Fu-Rong, Lu Yang. Ductile inorganic semiconductors for deformable electronics // Interdisciplinary Materials. — 2024. — Aug. — Vol. 3, no. 6. — P. 835–846. — URL: http://dx.doi.org/10.1002/idm2.12209.

60. Multiferroicity in plastically deformed SrTiO3 / Xi Wang [et al.] // Nature communications. — 2024. — Aug. — Vol. 15, no. 1. — URL: http://dx.doi.org/10.1038/s41467-024-51615-z.

61. Man-made diamonds / F. P. Bundy [et al.] // Nature. — 1955. — July. — Vol. 176, no. 4471. — P. 51–55. — URL: http://dx.doi.org/10.1038/176051a0.

62. Wentorf R. H. Cubic form of boron nitride // The Journal of chemical physics. — 1957. — Apr. — Vol. 26, no. 4. — P. 956–956. — URL: http://dx.doi.org/10.1063/1.1745964.

63. Wentorf R. H., DeVries R. C., Bundy F. P. Sintered superhard materials // Science. — 1980. — May. — Vol. 208, no. 4446. — P. 873–880. — URL: http://dx.doi.org/10.1126/science.208.4446.873.

64. Liew W. Y. H., Yuan S., Ngoi B. K. A. Evaluation of machining performance of STAVAX with PCBN tools // The International journal of advanced manufacturing technology. — 2004. — Jan. — Vol. 23, no. 1-2. — P. 11–19. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/s00170-002-1520-y.

65. Solozhenko Vladimir L., Kurakevych Oleksandr O., Le Godec Yann. Creation of nanostuctures by extreme conditions: high-pressure synthesis of ultrahard nanocrystalline cubic boron nitride // Advanced materials. — 2012. — Feb. — Vol. 24, no. 12. — P. 1540–1544. — URL: http://dx.doi.org/10.1002/adma.201104361.

66. Ultrahard nanotwinned cubic boron nitride / Yongjun Tian [et al.] // Nature. — 2013. — Jan. — Vol. 493, no. 7432. — P. 385–388. — URL: http://dx.doi.org/10.1038/nature11728.

67. Ultrananocrystalline diamond thin films for MEMS and moving mechanical assembly devices / A. R. Krauss [et al.] // Diamond and Related Materials. — 2001. — Nov. — Vol. 10, no. 11. — P. 1952–1961. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/S0925-9635(01)00385-5.

68. Dynamic indentation response of fine-grained boron carbide / Dipankar Ghosh [et al.] // Journal of the American Ceramic Society. — 2007. — June. — Vol. 90, no. 6. — P. 1850–1857. — URL: http://dx.doi.org/10.1111/j.1551-2916.2007.01652.x.

69. Characterization of hardness, elastic modulus and fracture toughness of RB-SiC ceramics at elevated temperature by Vickers test / Xiaoshuang Rao [et al.] // Materials science and engineering: A. — 2019. — Jan. — Vol. 744. — P. 426–435. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2018.12.044.

70. Mechanical characterization of fine grained silicon carbide consolidated using polymer pyrolysis and spark plasma sintering / Arif Rahman [et al.] // Ceramics International. — 2014. — Sept. — Vol. 40, no. 8. — P. 12081–12091. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.04.048.

71. Microstructure and mechanical properties of boron carbide thin films / Zenghu Han [et al.] // Materials letters. — 2002. — Dec. — Vol. 57, no. 4. — P. 899–903. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/S0167-577X(02)00892-3.

72. Superhard nanocrystalline silicon carbide films / Feng Liao [et al.] // Applied physics letters. — 2005. — Apr. — Vol. 86, no. 17. — URL: http://dx.doi.org/10.1063/1.1920434.

73. Advances in silicon carbide science and technology at the micro- and nanoscales / Roya Maboudian [et al.] // Journal of vacuum science and technology A: vacuum, surfaces, and films. — 2013. — June. — Vol. 31, no. 5. — URL: http://dx.doi.org/10.1116/1.4807902.

74. Thevenot Francois. Boron carbide - a comprehensive review // Journal of the European ceramic society. — 1990. — Jan. — Vol. 6, no. 4. — P. 205–225. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/0955-2219(90)90048-K.

75. Koyanagi Takaaki, Katoh Yutai, Nozawa Takashi. Design and strategy for next-generation silicon carbide composites for nuclear energy // Journal of nuclear materials. — 2020. — Nov. — Vol. 540. — P. 152375. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.jnucmat.2020.152375.

76. An Qi, Goddard William A., Cheng Tao. Atomistic explanation of shear-induced amorphous band formation in boron carbide // Physical Review Letters. — 2014. — Aug. — Vol. 113, no. 9. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.113.095501.

77. Atomic structure of amorphous shear bands in boron carbide / K. Madhav Reddy [et al.] // Nature communications. — 2013. — Sept. — Vol. 4, no. 1. — URL: http://dx.doi.org/10.1038/ncomms3483.

78. Chen Mingwei, McCauley James W., Hemker Kevin J. Shock-induced localized amorphization in boron carbide // Science. — 2003. — Mar. — Vol. 299, no. 5612. — P. 1563–1566. — URL: http://dx.doi.org/10.1126/science.1080819.

79. Grady D. E. Shock-wave compression of brittle solids // Mechanics of materials. — 1998. — Aug. — Vol. 29, no. 3-4. — P. 181–203. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/S0167-6636(98)00015-5.

80. Vogler T. J., Reinhart W. D., Chhabildas L. C. Dynamic behavior of boron carbide // Journal of applied physics. — 2004. — Apr. — Vol. 95, no. 8. — P. 4173–4183. — URL: http://dx.doi.org/10.1063/1.1686902.

81. Evans Anthony G. Perspective on the development of high-toughness ceramics // Journal of the American ceramic society. — 1990. — Feb. — Vol. 73, no. 2. — P. 187–206. — URL: http://dx.doi.org/10.1111/j.1151-2916.1990.tb06493.x.

82. Ritchie Robert O. The conflicts between strength and toughness // Nature materials. — 2011. — Oct. — Vol. 10, no. 11. — P. 817–822. — URL: http://dx.doi.org/10.1038/nmat3115.

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

Zinaida Alekseevna Tolyanina — 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: ms.zinaida.tolyanina@yandex.ru
ORCID iD 0000-0003-2937-3889
Web of Science ResearcherID HMV-0830-2023

Секция 2

Науки об образовании

2.1 Теория и методика обучения и воспитания

Научная статья
УДК 372.853
ББК 74.489
ГРНТИ 14.35.09
ВАК 5.8.2.
PACS 04.20.Cv
OCIS 000.2060
MSC 83D05

Педагогическое проектирование учебного модуля по современным моделям осциллирующей Вселенной для подготовки будущих учителей физики

Н. В. Криворотова [1]

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

Поступила в редакцию 19 мая 2026 года
После переработки 21 мая 2026 года
Опубликована 30 июня 2026 года

Аннотация. Рассматриваются результаты педагогического проектирования учебного модуля по современным моделям осциллирующей Вселенной для подготовки будущих учителей физики. Обосновывается целесообразность использования современных космологических сюжетов не как набора готовых сведений, а как материала для различения наблюдательных данных, модельных допущений, гипотез и проверяемых следствий. Предлагается структура модуля, объединяющая анализ стандартной космологической модели и циклических сценариев развития Вселенной, а также критическое рассмотрение авторских осциллирующих гипотез. Описаны учебные действия, диагностические показатели и варианты заданий, направленных на развитие модельного мышления, анализа доказательств, критической оценки и аргументации. Сделан вывод о том, что дидактически корректное сопоставление космологических моделей может стать средством формирования научного мышления при условии явного обозначения статуса каждого утверждения и границ его обоснованности.

[1] E-mail: n_krivorotova@bk.ru

Ключевые слова: научное мышление, подготовка учителя физики, космологическая модель, осциллирующая Вселенная, физическая космология, критическое мышление, учебный модуль, педагогическое проектирование

Введение

Современная физика ориентирована не только на усвоение готовых знаний, но и на понимание способов их получения и обоснования. Космология, соединяющая математическое моделирование и наблюдательные данные, создаёт продуктивный контекст для такой подготовки. Современная подготовка будущего учителя физики предполагает освоение не только предметного содержания, но и способов получения, проверки и аргументирования научного знания. Особенно продуктивным контекстом для такой подготовки является космология: в ней выводы строятся на сопоставлении математических моделей, косвенных наблюдений и статистической интерпретации данных. Материалы космической миссии Planck, наблюдения барионных акустических осцилляций DESI и данные тайминга пульсаров демонстрируют, что одно и то же эмпирическое поле может быть описано через несколько конкурирующих объяснительных схем [1–3].

Вместе с тем при изучении современной космологии возникает риск подмены научного анализа пересказом эффектных сюжетов. Для будущего учителя принципиально важно различать: непосредственно измеряемые величины; параметры, получаемые после выбора модели; теоретические допущения;гипотезы, которые требуют независимой проверки. Это требование особенно значимо при обсуждении осциллирующих, циклических сценариев, где наряду с академическими моделями существуют авторские концепции с различной степенью теоретической разработанности и эмпирического подтверждения [4–7].

Подготовка будущего учителя физики предполагает освоение способов научного рассуждения: сопоставления моделей, анализа доказательств и определения границ применимости выводов. История становления моделей расширяющейся Вселенной показывает значение согласования математических описаний, эмпирических оснований и критического обсуждения альтернатив [8, 9]. Однако дискуссионные космологические сюжеты в вузовском курсе обычно служат лишь иллюстрацией. Поэтому актуальна разработка модуля, в котором модели осциллирующей Вселенной применяются для развития научного мышления.

Цель работы состоит в обосновании и описании дидактической конструкции учебного модуля по современным моделям осциллирующей Вселенной, направленного на развитие научного мышления будущих учителей физики. В статье не предпринимается попытка установить преимущество одной космологической модели над другой. Напротив, предлагается способ организации учебной деятельности, при котором обучающиеся учатся сопоставлять статус утверждений, анализировать основания моделей и формулировать выводы с указанием границ уверенности.

Для достижения цели поставлены следующие задачи исследования:

1. проанализировать источники по методикам преподавания моделей развития Вселенной,
2. определить содержательные и дидактические основания учебного модуля по современным моделям осциллирующей Вселенной,
3. разработать проблемные задания для учебного модуля по современным моделям осциллирующей Вселенной,
4. предложить критерии оценки динамики научного мышления в рамках изучения учебного модуля по современным моделям осциллирующей Вселенной.

Объектом исследования является процесс профессиональной подготовки будущих учителей физики в магистратуре. Предметом исследования является содержание, формы организации и диагностические средства учебного модуля по современным моделям осциллирующей Вселенной, направленного на развитие научного мышления магистрантов. Осциллирующие модели понимаются как циклические сценарии и сценарии отскока, затрагивающие смену фаз сжатия и расширения, сингулярность, энтропию и наблюдаемые следствия. Они рассматриваются как материал для анализа проверяемых гипотез и их ограничений.

Научная новизна работы состоит в интеграции современного космологического содержания и методики развития научного мышления будущих учителей физики в едином модульном формате. Материал отбирается по критериям научной корректности, проблемности, сопоставимости альтернативных объяснений, доступности источников и возможности методического переноса. Центральной единицей модуля является исследовательское задание, требующее отделять наблюдательный факт от интерпретации, выявлять допущения модели, формулировать проверяемый вопрос и аргументировать вывод.

Методологическую основу составляют идеи научности и проблемности обучения физике, представления о модели как средстве объяснения и прогнозирования, компетентностный и деятельностный подходы. Применяются анализ, сопоставление, систематизация и обобщение научной, учебно-методической и нормативной литературы; сравнительный анализ космологических моделей; педагогическое проектирование. В ходе апробации предусматриваются входная и итоговая диагностика, анализ письменных и методических работ студентов, самооценка, качественный и количественный анализ результатов. Критерии ориентированы на оценку аргументации, работы с моделями и переноса способов рассуждения в новую ситуацию [10, 11].

Содержательные основания проектирования учебного модуля

Стандартная космологическая модель описывает эволюцию однородной и изотропной Вселенной с помощью уравнений общей теории относительности и набора параметров, определяемых по наблюдательным данным. В упрощенном виде динамика масштабного фактора $a\,(t)$ выражается первым уравнением Фридмана:

$$H^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{kc^2}{a^2} + \frac{\Lambda c^2}{3}\ . \qquad (1)$$

Здесь H характеризует темп расширения, ρ – плотность энергии и вещества, k – параметр пространственной кривизны, Λ – космологическая постоянная. Сама формула не определяет единственный сценарий эволюции: результат зависит от состава материи, значений параметров, начальных условий и физической интерпретации входящих величин. Поэтому её использование в обучении оправдано не только как средство решения вычислительных задач, но и как точка входа в анализ структуры модели.

Наблюдательные программы задают ограничения, с которыми должны соотноситься любые альтернативные космологические построения. Итоговый анализ данных спутника Planck уточняет параметры ΛCDM по данным реликтового микроволнового излучения [1]. Измерения DESI по барионным акустическим осцилляциям позволяют анализировать историю расширения через космологическую «стандартную линейку» [2]. Наногерцовый гравитационно-волновой фон, выявленный по данным NANOGrav, демонстрирует, что один сигнал допускает несколько астрофизических и космологических интерпретаций [3]. Для учебного модуля важен именно этот методологический вывод: наблюдение не совпадает с объяснением наблюдения.

Модели космологического отскока рассматривают переход от стадии сжатия к стадии расширения без классической начальной сингулярности. В обзорных работах подчеркивается, что привлекательность идеи отскока сопровождается трудностями: необходимостью указать физический механизм перехода, исследовать устойчивость решения, учесть анизотропию и согласовать предсказания с наблюдаемыми свойствами ранней Вселенной [4, 5]. Следовательно, с точки зрения дидактики корректное знакомство с такими сценариями должно включать не только описание идеи «отскока», но и анализ условий её применимости и проблем, которые остаются открытыми.

Отдельную группу составляют авторские осциллирующие гипотезы, связывающие космологическую динамику с чёрными дырами, гравитационным излучением и изменением гравитационной массы системы. В работах Н. Горькавого и А. Василькова предложено модифицированное уравнение типа Фридмана для системы с переменной гравитационной массой [6]. В другой публикации Н. Горькавый интерпретирует возможный наногерцовый гравитационно-волновой фон как следствие процессов в предшествующей фазе сжатия и формулирует наблюдательный признак, который, по мысли автора, может отличать этот вариант от других объяснений [7]. В учебном модуле такие работы целесообразно предъявлять как авторские, проверяемые гипотезы: обучающийся должен уметь назвать их предпосылки, следствия и необходимые независимые проверки.

Научное мышление как целевой результат учебного модуля

В педагогической литературе научное мышление связывают с действиями, которые позволяют ставить вопросы, формулировать гипотезы, строить и использовать модели, анализировать данные и обосновывать выводы. Исследование С. Хан и М. Крэлл показывает, что у будущих учителей естественно-научных дисциплин эти умения развиты неравномерно: одни обучающиеся увереннее работают с фактическим материалом, другие обучающиеся увереннее работают с моделированием или планированием исследования [12]. Поэтому результат учебного модуля следует описывать не общим утверждением «развитие мышления», а через конкретные наблюдаемые действия.

М. Крэлл, А. Ворхольцер и А. Неринг обосновывают переход от глобального измерения научного рассуждения к более детальному описанию компетенций: необходимо учитывать знания, познавательные операции, действия в конкретной ситуации и контекст задания [13]. А. Гарсия-Кармона разграничивает научное и критическое мышление, рассматривая их как самостоятельные, но взаимосвязанные процессы: первое ориентировано на построение объяснения на основе доказательств, второе ориентировано на оценку качества аргументов и выбор наиболее обоснованной позиции среди альтернатив [14].

Для подготовки будущего учителя физики это означает, что обсуждение космологических моделей должно приводить к двоякому результату. С одной стороны, магистрант осваивает сложное естественно-научное содержание и понимает границы его применимости. С другой стороны, он приобретает опыт педагогического преобразования этого содержания: учится формулировать вопрос, подбирать источник, строить задание, оценивать ответ и предупреждать некорректные обобщения. Такой подход согласуется с исследованиями, подчеркивающими необходимость обновления содержания физического образования, развития физического мышления и исследовательской деятельности будущих педагогов [15–17].

Принципы отбора содержания и организации учебной деятельности

Проектирование модуля предлагается осуществлять на четырех принципах. Первым принципом является доказательная прозрачность. Каждый используемый тезис должен быть отнесен к одному из типов: наблюдательный факт, модельный параметр, теоретическое следствие, авторская гипотеза или интерпретация. Вторым принципом является сопоставимость. Альтернативные модели сравниваются по одинаковым основаниям: исходным предпосылкам, механизму динамики, объясняемым явлениям, предсказаниям и ограничениям. Третьим принципом является фальсифицируемость. Обучающийся должен видеть, какое наблюдение могло бы усилить, ослабить или опровергнуть конкретную гипотезу. Четвёртым принципом является педагогическая трансформация: научный материал завершается созданием задания, которое может быть использовано в будущей работе учителя.

Содержательная линия «модели и данные» включает работу с сокращенными фрагментами научных публикаций и визуализациями результатов Planck, DESI и PTA-наблюдений. Её задача состоит в том, чтобы сформировать различение между измерением и интерпретацией. Линия «сингулярность и отскок» направлена на сопоставление стандартной динамики и циклических сценариев. Линия «авторская гипотеза» предлагает реконструировать логику конкретной осциллирующей модели без заранее заданной оценки её истинности. Наконец, линия «педагогическая трансформация» связывает научный анализ с разработкой учебного задания для школьников или студентов.

Учебный модуль выстроен вокруг четырёх содержательных линий модуля, каждая из которых опирается на определённый научный материал, предполагает формирование конкретных учебных действий и завершается созданием ожидаемого продукта. Первая линия по моделям и данным базируется на таких источниках, как CMB, BAO и PTA-наблюдения [1–3]; в её рамках учащиеся учатся различать данные, физические параметры и интерпретации, а итоговым результатом становится карта «данные–модель–вывод». Вторая линия по сингулярности и отскоку посвящена циклическим сценариям [4, 5]; здесь основное учебное действие состоит в сопоставлении предпосылок, физических механизмов и ограничений разных подходов, а продуктом работы выступает сравнительная матрица моделей. Третья линия связана с авторской осциллирующей гипотезой и опирается на представления о переменной гравитационной массе и PTA-фоне [6, 7]; в ходе её освоения учащиеся выявляют проверяемые следствия и допущения гипотезы, формируя в качестве итогового продукта карту аргументации и вопросов проверки. Наконец, четвёртая линия по педагогической трансформации ориентирована на методику преподавания физики и исследовательскую подготовку [15–17]; она направлена на развитие умения проектировать проблемные задания и критерии их оценки, а её результатом становится фрагмент занятия либо методический кейс.

Математическая и графическая опора сравнения моделей

Использование математических выражений в модуле не предполагает построения полноценного курса по релятивистской космологии. Его цель состоит в том, чтобы показать студентам различие между общим математическим аппаратом и конкретной физической реализацией модели. Например, для иллюстрации периодической динамики может быть использована условная функция:

$$a\left(t\right) = a_{\min} + A\frac{1-\cos\left(2\pi t/T\right)}{2}\ . \qquad (2)$$

В этой записи a_min задаёт ненулевой минимальный масштаб, A – амплитуду цикла, T – его период. Формула не является выводом конкретной космологической теории и не

описывает реальные наблюдения; она служит дидактической моделью, позволяющей визуально различить монотонное расширение и циклическое изменение масштабного фактора. Обсуждение такой схемы помогает студентам отделить математический образ от физического объяснения того, почему модель могла бы иметь именно такую форму.

Диагностика развития научного мышления

Диагностическая часть модуля должна проверять не объем запомненных терминов, а качество мыслительных действий. Для этого предлагается использовать входные и итоговые задания, имеющие одинаковую логическую структуру, но различный предметный материал. Например, на входе студент анализирует краткое сообщение о реликтовом излучении, а на выходе студент выдаёт фрагмент о гравитационно-волновом фоне или альтернативной модели. В обоих случаях от него требуется классифицировать утверждения, выделить доказательства, назвать ограничения и сформулировать аргументированный вывод.

В качестве рабочего показателя для анализа результатов может использоваться интегральный индекс научного мышления $I_{\text{нм}}$. Он не заменяет психометрически валидированную методику и не должен интерпретироваться как абсолютная характеристика личности. Его функция состоит в том, чтобы обеспечить прозрачное сопоставление нескольких компонентов в рамках конкретного учебного модуля:

$$I_{\text{нм}} = \frac{D + M + E + A}{4} \, . \tag{3}$$

где D – различение факта, модели и гипотезы, M – понимание структуры модели, E – анализ доказательств и ограничений, A – качество аргументации. Каждый компонент целесообразно оценивать по трехбалльной рубрике. Такая процедура согласуется с представлением о научном рассуждении как о совокупности взаимосвязанных, но не тождественных умений [12, 13].

Рубрика диагностики компонентов научного мышления включает четыре ключевых показателя. По критерию на различение статуса утверждений на низком уровне (0 баллов) испытуемый не различает факт, интерпретацию и гипотезу; на базовом уровне (1–2 балла) он способен различать отдельные типы утверждений; на продвинутом уровне (3 балла) он способен корректно классифицировать утверждения и обосновывает проведённое различение. В рамках показателя на анализ модели при низком уровне учащийся ограничивается пересказом содержания без выделения допущений; на базовом уровне он называет отдельные параметры или предпосылки модели; на продвинутом он называет умело связывает между собой допущения, механизм работы модели, её следствия и ограничения. При оценке работы с доказательствами низкий уровень проявляется в том, что учащийся просто ссылается на источник, не оценивая его роль в аргументации; на базовом уровне он способен указать отдельные данные или аргументы; на продвинутом уровне он способен сопоставлять имеющиеся данные, рассматривает альтернативные варианты и оценивает степень уверенности в выводах. Наконец, по параметру на аргументацию и педагогический перенос на низком уровне формулируется бездоказательный вывод; на базовом уровне приводится частичное обоснование; на продвинутом уровне строится полноценный вывод, включающий основания, ограничения и соответствующее учебное задание.

Результаты проектирования учебного модуля и их обсуждение

Результатом проведённого проектирования является структура модуля объёмом 24 академических часа, в которой космологическое содержание и развитие научного мышления организованы как единый процесс. Каждая содержательная линия завершается

конкретным образовательным продуктом: картой аргументации, сравнительной матрицей моделей, анализом фрагмента научной публикации или разработанным методическим кейсом. Благодаря этому оценка результата опирается не только на тестовые ответы, но и на качество действий студента с источниками, моделями и доказательствами.

Предлагаемая конструкция позволяет избежать двух крайностей. Первая крайность состоит в некритическом представлении авторской осциллирующей модели как установленного знания. Вторая крайность состоит в отказе от обсуждения современных дискуссионных тем из-за их сложности. В модуле авторские гипотезы рассматриваются как содержательный материал для научной экспертизы: студент учится задавать к ним те же вопросы, которые применимы к любой модели, что является исходным допущением, какое следствие выводится, какие данные релевантны, какова область применимости и что может служить опровержением.

Практическая ориентированность обеспечивается включением педагогической задачи. Например, магистранту предлагается подготовить для старшеклассников короткое задание по различению «наблюдения» и «объяснения» на материале сообщений о гравитационных волнах. Такое задание должно содержать источник, вопрос, ожидаемый ход рассуждения и критерии оценки. В дальнейшем апробация модуля может быть организована как педагогический эксперимент с входной и итоговой диагностикой, анализом образовательных продуктов, самооценкой и экспертной оценкой. Системный характер подготовки будущего учителя, включая связь содержательной и практической составляющих, поддерживается исследованиями по исследовательской деятельности и методическим практикумам [16, 17].

Заключение

Предложенный учебный модуль связывает космологическое содержание с развитием четырёх компонентов научного мышления: различения статуса утверждений, анализа структуры модели, оценки доказательств и аргументированной коммуникации. Таблицы, формулы и схематический график выполняют в нём не иллюстративную, а учебно-исследовательскую функцию: они побуждают студента переходить от описания к постановке вопроса о предпосылках, следствиях и границах применимости. Современные модели осциллирующей Вселенной могут быть продуктивно включены в подготовку будущих учителей физики при соблюдении научной корректности содержания и специально организованной деятельности по анализу моделей. Наблюдательные данные, стандартная ΛCDM-модель и циклические сценарии развития Вселенной, а также отдельные авторские гипотезы должны быть представлены в разных статусах и сопоставлены по одинаковым критериям.

Разработана концепция модуля из четырёх блоков: нестационарная Вселенная и стандартная модель; циклические сценарии и сценарии отскока; критическое рассмотрение авторской версии осциллирующей модели; педагогическое применение полученных знаний. Разработана структура модуля объёмом 24 академических часа, включающая четыре блока: «Модели и данные», «Сингулярность и отскок», «Авторская осциллирующая модель», «Педагогическая трансформация». Для каждого блока определены виды деятельности и образовательные продукты: карта аргументации, сравнительная матрица моделей, анализ фрагмента научной публикации и методический кейс. Определены индикаторы научного мышления: различение факта, гипотезы и модели; соотнесение утверждения с источником и данными; полнота аргументации; указание границ применимости модели. Предложены четыре диагностических показателя: различение статуса утверждений, анализ структуры модели, оценка доказательств и аргументированная коммуникация.

В настоящей статье описаны результаты педагогического проектирования, но не содержатся эмпирические данные о приросте показателей у студентов, изучающих учебный модуль по современным моделям осциллирующей Вселенной. Получение таких данных является задачей следующего этапа по апробации учебного модуля на конкретной выборке с соблюдением требований к диагностическим материалам, условиям проведения и интерпретации результатов.

Показано, что современная космология может быть содержательной основой развития научного мышления при соблюдении доказательной прозрачности и академической нейтральности. Стандартная ΛCDM-модель и циклические сценарии, а также авторские гипотезы должны предъявляться как модели с различным статусом обоснованности.

Практическая ценность работы состоит в возможности использования материалов учебного модуля в магистерских дисциплинах по современной физике, астрономии и методике обучения физике. Перспективой дальнейшей работы является апробация модуля и анализ её результатов на основе предложенной рубрики и комплекса качественных и количественных методов.

Список использованных источников

1. Planck 2018 results: VI. Cosmological parameters / N. Aghanim [et al.] // Astronomy and astrophysics. — 2020. — Sept. — Vol. 641. — P. A6. — URL: http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201833910.

2. DESI 2024 VI: cosmological constraints from the measurements of baryon acoustic oscillations / A.G. Adame [et al.] // Journal of cosmology and astroparticle physics. — 2025. — Feb. — Vol. 2025, no. 02. — P. 021. — URL: http://dx.doi.org/10.1088/1475-7516/2025/02/021.

3. The NANOGrav 15 yr data set: evidence for a gravitational-wave background / Gabriella Agazie [et al.] // The astrophysical journal letters. — 2023. — June. — Vol. 951, no. 1. — P. L8. — URL: http://dx.doi.org/10.3847/2041-8213/acdac6.

4. Battefeld Diana, Peter Patrick. A critical review of classical bouncing cosmologies // Physics reports. — 2015. — Apr. — Vol. 571. — P. 1–66. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.physrep.2014.12.004.

5. Brandenberger Robert, Peter Patrick. Bouncing cosmologies: progress and problems // Foundations of physics. — 2017. — Feb. — Vol. 47, no. 6. — P. 797–850. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/s10701-016-0057-0.

6. Gorkavyi Nick, Vasilkov Alexander. A modified Friedmann equation for a system with varying gravitational mass // Monthly notices of the Royal Astronomical Society. — 2018. — Feb. — Vol. 476, no. 1. — P. 1384–1389. — URL: http://dx.doi.org/10.1093/mnras/sty335.

7. Gorkavyi N. Gravitational wave background discovered by NANOGrav as evidence of a cyclic universe // New Astronomy. — 2022. — Feb. — Vol. 91. — P. 101698. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.newast.2021.101698.

8. Vizgin Vladimir. The expanding Universe: at the crossroads of historical and scientific concepts (to the 100th anniversary of the discovery of A. A. Fridman) // Science management: theory and practice. — 2022. — June. — Vol. 4, no. 2. — P. 233–256. — URL: http://dx.doi.org/10.19181/smtp.2022.4.2.19.

9. Vizgin Vladimir. Standard models in physics and cosmology: formation, relationship and Russia's contribution to their development // Science management: theory and practice. — 2025. — June. — Vol. 7, no. 2. — P. 129–145. — URL: http://dx.doi.org/10.19181/smtp.2025.7.2.7.

10. Voronina Ludmila Valentinovna, Ozerova Tamara Sergeevna. Model for forming the ceritical thinking of future mining engineers and geological engineers in the process of learning mathematics // Pedagogical education in Russia. — 2021. — no. 5. — P. 67–78. — URL: http://dx.doi.org/10.26170/2079-8717_2021_05_08.

11. Ozerova Tamara Sergeevna, Voronina Ludmila Valentinovna. Critical thinking in the professional activity of future mining engineers-geologists // Pedagogical education in Russia. — 2021. — no. 3. — P. 150–156. — URL: http://dx.doi.org/10.26170/2079-8717_2021_03_17.

12. Khan Samia, Krell Moritz. Patterns of scientific reasoning skills among pre-service science teachers: a latent class analysis // Education sciences. — 2021. — Oct. — Vol. 11, no. 10. — P. 647. — URL: http://dx.doi.org/10.3390/educsci11100647.

13. Krell Moritz, Vorholzer Andreas, Nehring Andreas. Scientific reasoning in science education: from global measures to fine-grained descriptions of students' competencies // Education sciences. — 2022. — Jan. — Vol. 12, no. 2. — P. 97. — URL: http://dx.doi.org/10.3390/educsci12020097.

14. Garcia-Carmona Antonio. Scientific thinking and critical thinking in science education: two distinct but symbiotically related intellectual processes // Science and education. — 2023. — Sept. — Vol. 34, no. 1. — P. 227–245. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/s11191-023-00460-5.

15. Purysheva N. S., Isaev D. A. Current porblems of physics school education in the Russian Federation // Pedagogical education in Russia. — 2020. — no. 6. — P. 8–15. — URL: http://dx.doi.org/10.26170/po20-06-01.

16. Perevoshikova E. N. DEscription of educational results of training future physics teachers to research activities // Russian journal of education and psychology. — 2024. — June. — Vol. 15, no. 3. — P. 57–78. — URL: http://dx.doi.org/10.12731/2658-4034-2024-15-3-522.

17. Евстафьева К. С., Пурышева Н. С. Состояние и пути совершенствования практической подготовки будущего учителя физики // Философия образования. — 2024. — Mar. — Т. 24, № 1. — С. 130–146. — URL: http://dx.doi.org/10.15372/PHE20240109.

Сведения об авторах:

Наталья Владимировна Криворотова — студент очной магистратуры факультета физико-математического и технологического образования ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», Ульяновск, Россия.

E-mail: n_krivorotova@bk.ru

ORCID iD 0009-0000-0638-0727

Web of Science ResearcherID PMW-6808-2026

Original article
PACS 04.20.Cv
OCIS 000.2060
MSC 83D05

Pedagogical design of a training module on modern models of the oscillating Universe for the training of future physics teachers

N. V. Krivorotova

Ulyanovsk State Pedagogical University, 432071, Ulyanovsk, Russia

Submitted May 19, 2026
Resubmitted May 21, 2026
Published June 30, 2026

Abstract. This article examines the results of the pedagogical design of a training module on modern models of the oscillating Universe for the training of future physics teachers. It substantiates the feasibility of using modern cosmological concepts not as a set of ready-made information, but as a means of distinguishing between observational data, model assumptions, hypotheses, and testable consequences. A module structure is proposed that combines an analysis of the standard cosmological model and cyclical scenarios for the development of the Universe, as well as a critical examination of the author's oscillating hypotheses. Learning activities, diagnostic indicators, and assignment options aimed at developing model thinking, evidence analysis, critical evaluation, and argumentation are described. It is concluded that a didactically correct comparison of cosmological models can become a means of developing scientific thinking, provided the status of each statement and the limits of its validity are clearly defined.

Keywords: scientific thinking, physics teacher training, cosmological model, oscillating universe, physical cosmology, critical thinking, curriculum module, pedagogical design

References

1. Planck 2018 results: VI. Cosmological parameters / N. Aghanim [et al.] // Astronomy and astrophysics. — 2020. — Sept. — Vol. 641. — P. A6. — URL: http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201833910.

2. DESI 2024 VI: cosmological constraints from the measurements of baryon acoustic oscillations / A.G. Adame [et al.] // Journal of cosmology and astroparticle physics. — 2025. — Feb. — Vol. 2025, no. 02. — P. 021. — URL: http://dx.doi.org/10.1088/1475-7516/2025/02/021.

3. The NANOGrav 15 yr data set: evidence for a gravitational-wave background / Gabriella Agazie [et al.] // The astrophysical journal letters. — 2023. — June. — Vol. 951, no. 1. — P. L8. — URL: http://dx.doi.org/10.3847/2041-8213/acdac6.

4. Battefeld Diana, Peter Patrick. A critical review of classical bouncing cosmologies // Physics reports. — 2015. — Apr. — Vol. 571. — P. 1–66. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.physrep.2014.12.004.

5. Brandenberger Robert, Peter Patrick. Bouncing cosmologies: progress and problems // Foundations of physics. — 2017. — Feb. — Vol. 47, no. 6. — P. 797–850. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/s10701-016-0057-0.

6. Gorkavyi Nick, Vasilkov Alexander. A modified Friedmann equation for a system with varying gravitational mass // Monthly notices of the Royal Astronomical Society. — 2018. — Feb. — Vol. 476, no. 1. — P. 1384–1389. — URL: http://dx.doi.org/10.1093/mnras/sty335.

7. Gorkavyi N. Gravitational wave background discovered by NANOGrav as evidence of a cyclic universe // New Astronomy. — 2022. — Feb. — Vol. 91. — P. 101698. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.newast.2021.101698.

8. Khan Samia, Krell Moritz. Patterns of scientific reasoning skills among pre-service science teachers: a latent class analysis // Education sciences. — 2021. — Oct. — Vol. 11, no. 10. — P. 647. — URL: http://dx.doi.org/10.3390/educsci11100647.

9. Krell Moritz, Vorholzer Andreas, Nehring Andreas. Scientific reasoning in science education: from global measures to fine-grained descriptions of students' competencies // Education sciences. — 2022. — Jan. — Vol. 12, no. 2. — P. 97. — URL: http://dx.doi.org/10.3390/educsci12020097.

10. Garcia-Carmona Antonio. Scientific thinking and critical thinking in science education: two distinct but symbiotically related intellectual processes // Science and education. — 2023. — Sept. — Vol. 34, no. 1. — P. 227–245. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/s11191-023-00460-5.

11. Purysheva N. S., Isaev D. A. Current porblems of physics school education in the Russian Federation // Pedagogical education in Russia. — 2020. — no. 6. — P. 8–15. — URL: http://dx.doi.org/10.26170/po20-06-01.

12. Perevoshikova E. N. DEscription of educational results of training future physics teachers to research activities // Russian journal of education and psychology. — 2024. — June. — Vol. 15, no. 3. — P. 57–78. — URL: http://dx.doi.org/10.12731/2658-4034-2024-15-3-522.

13. Evstafieva K. S., Purysheva N. S. The current state and ways to improve the practical training of future physics teachers // Philosophy of education. — 2024. — Mar. — Vol. 24, no. 1. — P. 130–146. — URL: http://dx.doi.org/10.15372/PHE20240109.

14. Vizgin Vladimir. The expanding Universe: at the crossroads of historical and scientific concepts (to the 100th anniversary of the discovery of A. A. Fridman) // Science management: theory and practice. — 2022. — June. — Vol. 4, no. 2. — P. 233–256. — URL: http://dx.doi.org/10.19181/smtp.2022.4.2.19.

15. Vizgin Vladimir. Standard models in physics and cosmology: formation, relationship and Russia's contribution to their development // Science management: theory and practice. — 2025. — June. — Vol. 7, no. 2. — P. 129–145. — URL: http://dx.doi.org/10.19181/smtp.2025.7.2.7.

16. Voronina Ludmila Valentinovna, Ozerova Tamara Sergeevna. Model for forming the ceritical thinking of future mining engineers and geological engineers in the process of learning mathematics // Pedagogical education in Russia. — 2021. — no. 5. — P. 67–78. — URL: http://dx.doi.org/10.26170/2079-8717_2021_05_08.

17. Ozerova Tamara Sergeevna, Voronina Ludmila Valentinovna. Critical thinking in the professional activity of future mining engineers-geologists // Pedagogical education in Russia. — 2021. — no. 3. — P. 150–156. — URL: http://dx.doi.org/10.26170/2079-8717_2021_03_17.

Information about authors:

Natalia Vladimirovna Krivorotova — master's student of the Faculty of Physics, Mathematics and Technological Education of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Ulyanovsk State Pedagogical University", Ulyanovsk, Russia.

E-mail: n_krivorotova@bk.ru

ORCID iD 0009-0000-0638-0727

Web of Science ResearcherID PMW-6808-2026

Научная статья
УДК 372.853
ББК 74.489
ГРНТИ 14.35.09
ВАК 5.8.2.
PACS 01.40.Di
OCIS 000.2060
MSC 78A10

Педагогическое проектирование дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов в системе управления обучением MOODLE

Е. С. Павлова [1]

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

Поступила в редакцию 11 мая 2026 года
После переработки 12 мая 2026 года
Опубликована 30 июня 2026 года

Аннотация. Описан процесс разработки дистанционного курса, охватывающего ключевые аспекты физики метаматериалов. Дистанционный курс по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов разработан с помощью инструментария системы управления обучением MOODLE. При помощи модульной технологии разработан специализированный дистанционный курс, охватывающий ключевые аспекты физики и технологии наноструктур из квантовых метаматериалов. Дистанционный курс по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов построен с использованием модульной технологии построения курса, что позволяет эффективно управлять темпом продвижения по курсу по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов и применять смешанную технологию в преподавании физики и технологии квантовых метаматериалов. Теоретические материалы курса систематизировали и актуализировали знания о квантовых метаматериалах. Курс по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов интегрирован в образовательные платформы педагогического университета и планируется к использованию в образовательных программах бакалавриата и специалитета.

Ключевые слова: курс, дистанционный курс, квантовая оптика, оптика наноструктур, метаматериал, модульная технология, система управления обучением

Введение

Квантовая оптика наноструктур из периодических метаматериалов исследует фундаментальные взаимодействия света с искусственно созданными наноструктурами, демонстрирующими экзотические оптические свойства такие, как отрицательный показатель преломления, гиперболическая дисперсия или топологическая защита мод, ко-

[1] E-mail: kat.pavlova2003@icloud.com

торые невозможно воспроизвести в природных материалах. В квантовой оптике наноструктур ключевую роль играют квантовые эффекты на наномасштабе, включая размерное квантование в полупроводниковых или плазмонных наночастицах, взаимодействие квантовых эмиттеров (например, квантовых точек или излучательных центров) с локализованными плазмонами или микрорезонаторами, а также пустотное расщепление в гибридных системах метаматериал-квантовый источник. Нелинейная оптика метаматериалов в квантовом режиме открывает возможности для создания ультракомпактных устройств — таких как генераторы одиночных фотонов, параметрические усилители или квантовые переключатели, где нелинейные эффекты второго и третьего порядков усиливаются за счёт локализации поля в наноструктурах, снижая требуемую мощность лазерного излучения на несколько порядков. Приложения квантовой оптики наноструктур охватывают квантовые технологии нового поколения: от сверхчувствительных сенсоров на основе плазмонных наноантенн до квантовых компьютеров на фотонных кубитах, а также метаповерхности для управления поляризацией и фазой света в интегральной оптике, что критически важно для развития квантовых сетей и оптической обработки информации. Методологически исследователи сочетают теоретические подходы (квантовая электродинамика, теории эффективных сред, методы решёток) с экспериментальными техниками (ближнепольная оптическая микроскопия, спектроскопия нелинейного рассеяния, квантовая оптическая томография), что делает эту область передовой платформой для междисциплинарных исследований на стыке физики, материаловедения и информационных технологий.

Целью работы является исследование процесса создания дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов, обеспечивающего изучение темы с учётом современных научных достижений.

Для достижения указанной цели в работе поставлены следующие задачи исследования:

1. разработать модульную структуру и избранные элементы дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов в системе управления обучением MOODLE,
2. разработать материалы дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов в системе управления обучением MOODLE.

Объектом исследования является курс по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов. Предметом исследования является описание особенностей разработки модульной структуры и избранных элементов дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов в системе управления обучением MOODLE.

Методами исследования являются компьютерные методы разработки дистанционным курсов в системе управления обучением MOODLE, анализ научной литературы, методы педагогического дизайна для создания тематических модулей дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов. Материалами исследования являются литературные источники по исследованиям метаматериалов, программные платформы для дистанционного обучения.

Научная новизна исследования заключается в том, что впервые выполнена разработка программы курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов, объединяющего физические свойства и прикладные аспекты наноструктур из квантовых метаматериалов.

Гипотеза научного исследования заключается в том, что если использовать теоретические модели физических процессов в квантовых точках и результаты численных расчётов физических характеристик квантовых точек в дистанционном курсе по кван-

товой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов, то можно создать специализированный дистанционный курс, опирающийся на современные представления о физических свойствах наноструктур из квантовых метаматериалов, который повысит уровень компетенций обучающихся в области физики наноструктур из квантовых метаматериалов и упростит доступ к актуальным знаниям.

Теоретическая значимость исследования заключается в систематизации знаний по физике наноструктур из квантовых метаматериалов, структуризации образовательных материалов для дистанционного обучения. Практическая значимость исследования заключается в создании доступного дистанционного курса для подготовки специалистов в области физики наноструктур из квантовых метаматериалов.

Базой исследования для создания дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов в системе управления обучением MOODLE является образовательный портал ФГБОУ ВО «УлГПУ им. И. Н. Ульянова».

Описание этапов проектирования курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов в системе управления обучением MOODLE

Развитие квантовых технологий и метаматериалов требует системного подхода к подготовке специалистов, способных интегрировать принципы квантовой оптики и нанофотоники в разрабатываемые устройства, а курс на платформе MOODLE обеспечивает доступность обучения для широкого круга студентов и исследователей, включая отдалённые регионы и межуниверситетские программы. Интерактивные и мультимедийные инструменты системы управления обучением MOODLE позволяют эффективно моделировать сложные физические явления (например, нелинейные эффекты в метаматериалах или взаимодействие квантовых эмиттеров с нанорезонаторами), что критически важно для освоения междисциплинарной тематики, сочетающей квантовую механику, оптику и нанотехнологии. В условиях глобальной потребности в специалистах по квантовым технологиям (оптические вычисления, сенсоры, коммуникации) разработка структурированного дистанционного курса с использованием системы управления обучением MOODLE становится ключевым инструментом стандартизации образовательных стандартов, сокращения временных затрат на обучение и повышения качества подготовки кадров для высокотехнологичных отраслей.

Для успешного создания дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов, охватывающего 108 часов учебной нагрузки (3 зачётные единицы), необходимо последовательно пройти этапы концептуального проектирования, разработки контента, технической реализации и сопровождения. Каждый этап логически вытекает из предыдущего и направлен на обеспечение высокой эффективности обучения, доступности материала и вовлечённости студентов.

На первом этапе создания дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов проводится анализ образовательных потребностей и целевой аудитории. Курс по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов разработан для студентов, магистрантов и аспирантов, обладающих базовыми знаниями в области квантовой механики и электродинамики, но требующих углублённого понимания специфики квантовой оптики наноструктур и метаматериалов на основе анализа существующих курсов [1–10]. Анализ актуальных научных публикаций и требований рабочих программ позволяет определить ключевые темы, которые должны быть представлены в курсе, такие как теория Блоха, плазмонные эффекты, фотонные кристаллы и их приложения в квантовых технологиях. На этом этапе также обозначаются ожидаемые результаты обучения, включая умение моделировать квантовые

процессы в метаматериалах и анализировать современные исследования в области.

Далее формируется концепция курса, которая определяет его структуру, методику преподавания и формы контроля. В связи с дистанционной формой обучения особое внимание уделяется использованию интерактивных элементов, таких как лекции, интерактивные симуляции и задания с обратной связью. Структура курса включает девять тем, каждая из которых посвящена отдельному аспекту квантовой оптики метаматериалов, начиная с основ теории Блоха и заканчивая актуальными приложениями в квантовых технологиях. В концепции указывается, что каждая тема будет представлена не только в теоретическом, но и в практическом аспекте, с использованием численных методов и программного обеспечения для моделирования.

Следующим шагом становится разработка учебно-методического обеспечения, включающего сценарии лекционных занятий, задания для практических работ и материалы для самостоятельной работы. Для каждой из девяти тем создаются детализированные планы лекций, которые включают основные понятия, исторический контекст, примеры из научных исследований и актуальные приложения. Особое внимание уделяется визуализации сложных процессов, таких как формирование зонной структуры в фотонных кристаллах или поведение плазмонных мод в наноструктурах. Для практических занятий разрабатываются задания, направленные на освоение численных методов, например, моделирование зонной структуры с помощью программного обеспечения языка программирования Python, а также анализ нелинейных оптических эффектов в метаматериалах.

Одновременно с разработкой контента дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов осуществляется проектирование технической инфраструктуры курса в системе управления обучением MOODLE. На этом этапе создаётся структура курса, включающая разделы для каждой темы, форумы для обсуждений, системы оценки и обратной связи. Важным элементом является интеграция мультимедийных материалов, таких как лекции, презентации, интерактивные симуляции и ссылки на научные статьи. Для практических занятий в системе управления орбучением MOODLE настраиваются специальные инструменты, такие как задания с автоматизированной проверкой или задачи, требующие загрузки файлов с результатами моделирования физических процессов. Также разрабатывается система автоматизированных тестов для промежуточного и итогового контроля, которая позволяет оценивать понимание студентов теоретических и практических аспектов курса.

На следующем этапе разработки курса производится создание мультимедийных материалов, которые являются неотъемлемой частью дистанционного обучения. Лекции записываются с использованием современных инструментов, таких как OBS Studio, с подробными пояснениями и демонстрацией ключевых моментов. Презентации оформляются с учётом принципов доступности, включают анимации и схемы для наглядного объяснения сложных процессов. Для практических заданий разрабатываются пошаговые инструкции с примерами кода и скриншотами интерфейсов программного обеспечения, что облегчает самостоятельное освоение материала студентами. Также подбираются и адаптируются интерактивные симуляции, например, из библиотеки на языке Python или других образовательных ресурсов, для демонстрации физических процессов.

Важным аспектом разработки курса является организация интерактивного взаимодействия между преподавателем и студентами. В системе управления обучением MOODLE создаются форумы для обсуждения актуальных тем, где студенты могут задавать вопросы и делиться своими результатами исследований. Также организуются вебинары и онлайн-консультации, на которых преподаватель разъясняет сложные моменты и помогает студентам в решении практических задач. Для мотивации сту-

дентов и поддержания интереса к курсу можно использовать систему дополнительных баллов за активное участие в обсуждениях или выполнение дополнительных заданий. Это не только улучшает вовлечённость, но и способствует более глубокому усвоению материала.

Далее осуществляется пилотное тестирование курса в условиях реального обучения. Курс запускается в тестовом режиме на небольшой группе студентов, чтобы выявить возможные технические или методические проблемы. На этом этапе собирается обратная связь от участников, анализируются трудности, с которыми они столкнулись, и вносятся коррективы в содержание и структуру курса. Особое внимание уделяется удобству использования системы управления обучением MOODLE, качеству мультимедийных материалов и эффективности практических заданий. После внесения необходимых изменений курс готов к масштабному запуску.

Одновременно разрабатывается система оценки и контроля знаний, которая соответствует требованиям образовательного стандарта. Контроль осуществляется через комбинацию автоматизированных тестов, практических заданий и итогового проекта. Тесты включают вопросы разного уровня сложности, проверяющие как теоретическое понимание материала, так и умение применять его на практике. Практическое задание может включать моделирование конкретной наноструктуры с использованием численных методов и анализ полученных результатов. Итоговый проект предусматривает выполнение студентами исследовательской работы, например, разработку модели метаматериала для конкретного приложения и подготовку отчёта с презентацией результатов. Эта работа позволяет оценить глубину освоения материала и способность студентов к самостоятельной научной деятельности.

На этапе подготовки преподавателей и методистов организуются семинары и тренинги, на которых преподаватели знакомятся с особенностями дистанционного обучения, инструментами системы управления обучением MOODLE и методами оценки результатов. Также разрабатываются рекомендации по ведению занятий, включая примеры эффективного взаимодействия со студентами в онлайн-формате. Методисты обеспечивают сопровождение процесса обучения, наблюдая активность студентов и качество выполняемых заданий. Это позволяет своевременно выявлять пробелы в знаниях и корректировать учебный процесс.

Затем осуществляется запуск курса в полном формате с зачислением всех студентов группы. На этом этапе проводится инструктаж по использованию системы управления обучением MOODLE, правилами выполнения заданий и системами оценки. Студенты получают доступ ко всем материалам курса, включая лекции, презентации и практические задания. Преподаватель обеспечивает сопровождение процесса обучения, отвечая на вопросы и давая консультации как в асинхронном, так и в синхронном формате. Регулярный мониторинг позволяет выявлять проблемные моменты и вносить коррективы в учебный процесс.

В процессе обучения обеспечивается постоянная обратная связь как от студентов, так и от преподавателей. Студенты могут оставлять отзывы о сложности материала, качестве мультимедийных ресурсов и эффективности практических заданий. Эта информация позволяет оперативно корректировать курс, добавляя дополнительные материалы или изменяя формат представления информации. Также проводится анализ результатов выполнения заданий и тестов для выявления слабых мест в понимании материала и адаптации учебного процесса.

На заключительном этапе разработки дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов осуществляется анализ результатов обучения и перспективы развития курса. После завершения дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов проводится итоговый анализ

успеваемости студентов, оценивается эффективность используемых методик и выявляются направления для дальнейшего улучшения. Обратная связь от студентов и преподавателей позволяет определить, какие темы требуют углубления или изменения формата представления. Также разрабатываются планы по обновлению курса с учётом новых научных достижений в области квантовой оптики метаматериалов. Это может включать добавление новых тем, обновление практических заданий и интеграцию современных инструментов моделирования. Такой подход обеспечивает не только успешное освоение студентами курса, но и постоянное развитие учебного процесса с учётом потребностей и современных требований науки.

Первая тема посвящена изучению введения в квантовую оптику и электродинамику периодических структур. Вторая тема посвящена изучению квантовой теории взаимодействия света с периодическими наноструктурами. Третья тема посвящена изучению плазмонных наноструктур и квантовых эффектов наноплазмоники. Четвёртая тема посвящена изучению теории фотонных кристаллов и запрещённых зон. Пятая тема посвящена изучению нелинейных оптических эффектов в периодических метаматериалах и машинного обучения в дизайне метаматериалов. Шестая тема посвящена изучению квантовых источников света на основе метаматериалов. Седьмая тема посвящена изучению квантовой информации и перспектив применения метаматериалов в квантовых компьютерах, связи, криптографии. Восьмая тема посвящена изучению численных методов в квантовой оптике метаматериалов. Девятая тема посвящена изучению квантовых флуктуаций электромагнитного поля в нанощелях и эффекта Казимира в метаматериалах.

Создание дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов, рассчитанного на 108 академических часов (3 зачётные единицы), требует систематического подхода, учитывающего как научную сложность тематики, так и особенности дистанционного формата обучения. Реализация курса должна начинаться с глубокого анализа образовательных потребностей студентов, определяя не только их базовые знания в области квантовой механики и электродинамики, но и уровень подготовки в смежных областях, таких как численное моделирование и обработка экспериментальных данных физических экспериментов.

На первом этапе необходимо разработать детальную концепцию дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов, которая будет включать не только перечень тем, но и логическую последовательность их изложения с учётом постепенного усложнения материала. Тематика начинается с фундаментальных концепций, таких как теория Блоха и зонная структура, что обеспечивает студентам прочную основу для понимания последующих тем, посвящённых взаимодействию света с периодическими наноструктурами и плазмонным эффектам. Особое внимание следует уделить мотивации студентов, обосновывая актуальность изучаемых тем современными приложениями в квантовых технологиях, что способствует формированию исследовательского интереса.

Следующим важным шагом становится проработка структуры каждого учебного модуля с точки зрения его педагогической целесообразности. Каждая из девяти тем должна быть разбита на логические блоки, включающие теоретическую часть, практическое применение и контрольные задания. Например, тема о зонной структуре фотонных кристаллов должна сопровождаться интерактивными симуляциями для наглядной демонстрации формирования запрещённых зон, а тема о нелинейных оптических эффектах должна включать задачи на расчёт параметров нелинейности в различных метаматериалах. Это позволяет студентам не только усваивать теоретический материал, но и применять его на практике, что является ключевым в формировании профессиональных компетенций.

На этапе разработки учебно-методического обеспечения дистанционного курса необходимо уделить повышенное внимание созданию мультимедийных материалов, которые помогут компенсировать отсутствие очного взаимодействия. Лекции должны быть структурированы так, чтобы каждая из них фокусировалась на одном ключевом аспекте темы, сопровождаясь визуальными материалами, такими как анимации квантовых переходов в наноструктурах или графики дисперсионных зависимостей в фотонных кристаллах. Кроме того, следует предусмотреть интерактивные элементы, например, расчётные задачи с автоматизированной проверкой, которые позволят студентам сразу же получать обратную связь и корректировать свои знания.

Важным аспектом педагогического проектирования является интеграция в курс современных численных методов, без которых невозможно эффективное моделирование квантовых процессов в метаматериалах. Тема, посвящённая численным методам, должна включать не только теорию, но и практические примеры использования программного обеспечения, такого как COMSOL Multiphysics или библиотеки языка Python для расчёта электромагнитных полей. Это позволит студентам не только понять принципы моделирования, но и приобрести навыки, востребованные в научных исследованиях и промышленности. При этом важно предусмотреть разные уровни сложности заданий, чтобы учесть разнообразие подготовки участников.

Для обеспечения эффективного взаимодействия в дистанционном формате необходимо разработать систему интерактивных форумов и обсуждений, где студенты смогут задавать вопросы, делиться решениями практических задач и обсуждать актуальные научные статьи. Особое значение приобретают синхронные сессии, такие как вебинары, на которых преподаватель может разъяснить сложные моменты и организовать групповую работу по решению исследовательских задач. Такие элементы не только усиливают вовлечённость студентов, но и способствуют формированию сообщества, что особенно важно для сложных и специализированных курсов.

На этапе проектирования системы контроля знаний дистанционного курса необходимо предусмотреть комплексный подход, сочетающий автоматизированные тесты, практические задания и итоговый исследовательский проект. Тесты должны проверять как теоретическое понимание материала, так и умение применять его для решения типовых задач. Практическое задание, например, моделирование плазмонных мод в наноструктуре, позволит оценить навыки работы с программным обеспечением, а итоговый проект даст возможность студентам проявить творческий подход и применить полученные знания в исследовательской деятельности. При этом важно, чтобы система оценки была прозрачной и мотивирующей, с возможностью повторного выполнения заданий при необходимости.

Одновременно с разработкой контента необходимо подготовить техническую инфраструктуру курса в системе управления обучением MOODLE, обеспечивая удобный доступ к материалам и функционалу. Структура курса должна быть интуитивно понятной, с чётким разделением на модули и темы, а также с возможностью навигации между ними. Важно предусмотреть систему уведомлений о новых материалах или сроках сдачи заданий, что поможет студентам эффективно планировать своё время. Также следует интегрировать инструменты для совместной работы, такие как вики-страницы для группового написания обзоров литературы или обсуждений актуальных научных вопросов.

На этапе тестирования и пилотирования курса необходимо задействовать небольшую группу студентов или экспертов для выявления возможных проблем в структуре курса, качестве мультимедийных материалов и эффективности практических заданий. Обратная связь от участников позволит скорректировать содержание и формат представления информации, устранив сложности в восприятии сложных концепций. Особое

внимание следует уделить анализу результатов выполнения практических заданий и тестов, чтобы выявить темы, требующие дополнительного объяснения или усложнения.

После завершения пилотного тестирования и внесения необходимых коррективов курс запускается в полном объёме, с сопровождением преподавателя, который обеспечивает обратную связь и консультации. Важно поддерживать активное взаимодействие между преподавателем и студентами, используя как асинхронные, так и синхронные формы коммуникации. Регулярный мониторинг успеваемости и вовлечённости студентов позволит оперативно реагировать на возникающие трудности и вносить изменения в учебный процесс.

По завершении дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов необходимо провести анализ его эффективности, оценивая не только успеваемость студентов, но и качество усвоения материала. Обратная связь от участников поможет выявить сильные и слабые стороны курса, а также определить направления для его дальнейшего развития. Особое внимание следует уделить обновлению контента с учётом новых научных достижений, например, в области квантовых технологий или новых методов моделирования, что позволит курсу оставаться актуальным и востребованным.

Результаты разработки избранных элементов дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов в системе управления обучением MOODLE

Первая лекция дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов посвящена изучению введения в квантовую оптику и электродинамику периодических структур. Вторая лекция дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов посвящена изучению квантовой теории взаимодействия света с периодическими наноструктурами. Третья лекция дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов посвящена изучению плазмонных наноструктур и квантовых эффектов наноплазмоники. Четвёртая лекция дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов посвящена изучению теории фотонных кристаллов и запрещённых зон. Пятая лекция дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов посвящена изучению нелинейных оптических эффектов в периодических метаматериалах и машинного обучения в дизайне метаматериалов. Шестая лекция дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов посвящена изучению квантовых источников света на основе метаматериалов. Седьмая лекция дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов посвящена изучению квантовой информации и перспектив применения метаматериалов в квантовых компьютерах, связи, криптографии. Восьмая лекция дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов посвящена изучению численных методов в квантовой оптике метаматериалов. Девятая лекция дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов посвящена изучению квантовых флуктуаций электромагнитного поля в нанощелях и эффекта Казимира в метаматериалах.

На рис. 1 приведено изображение страницы тематических модулей первой зачётной единицы дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 2 приведено изображение страницы тематических модулей второй зачётной единицы дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых

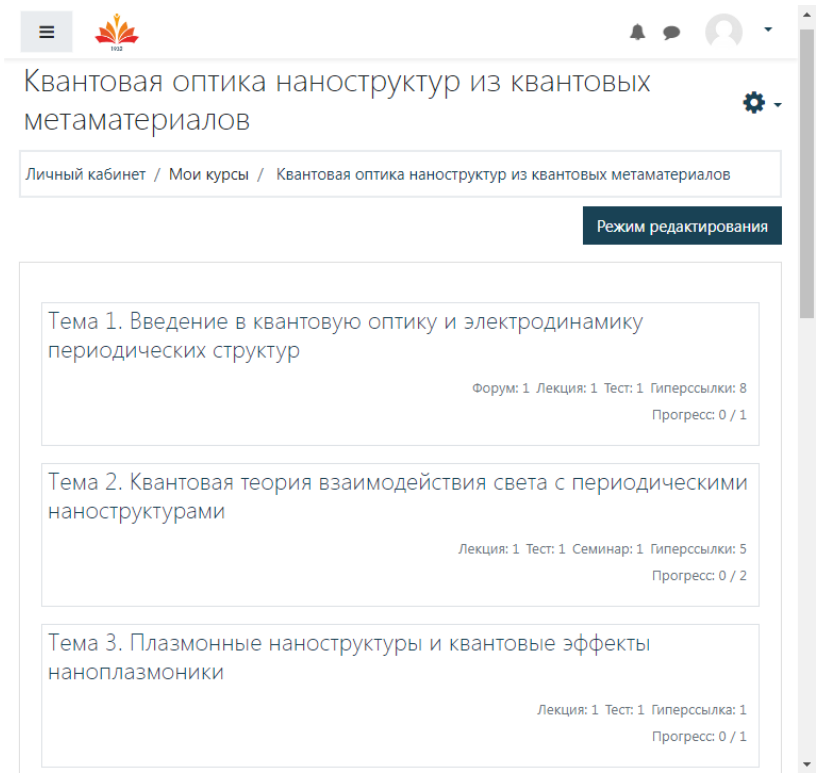


Рис. 1. Страница тематических модулей первой зачётной единицы дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE

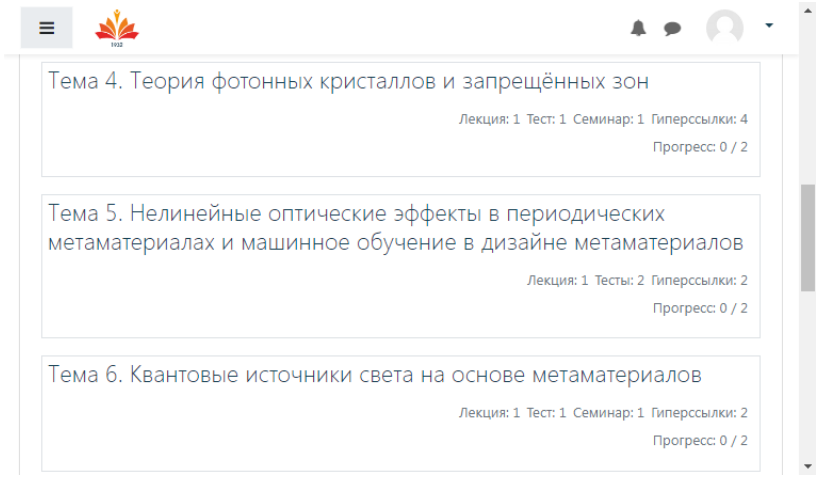


Рис. 2. Страница тематических модулей второй зачётной единицы дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериаловм, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE

метаматериалов, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 3 приведено изображение страницы тематических модулей третьей зачётной единицы дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 4 приведено изображение страницы элементов первой темы дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов, созданного на

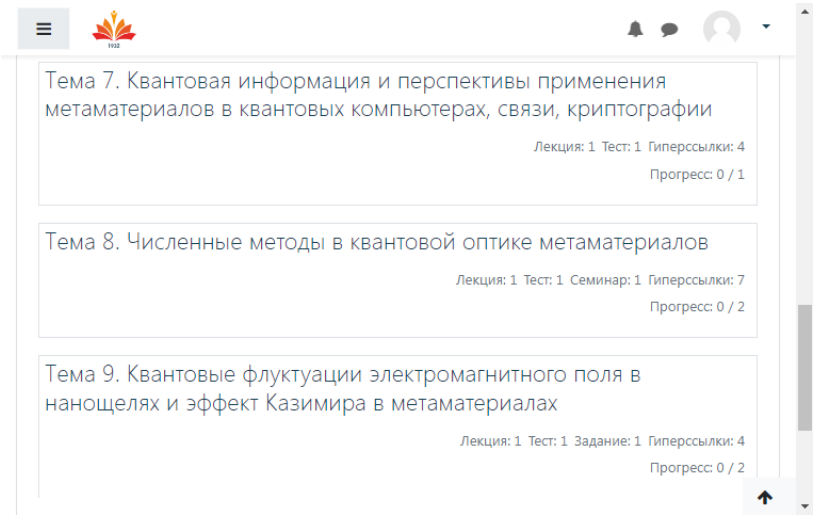


Рис. 3. Страница тематических модулей третьей зачётной единицы дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE

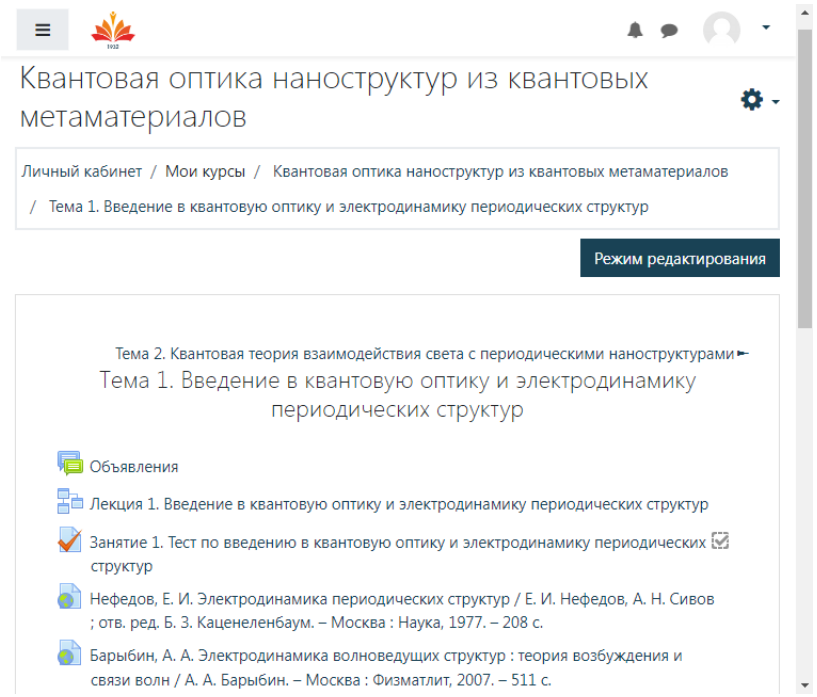


Рис. 4. Страница элементов первой темы дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE

образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 5 приведено изображение страницы элементов второй темы дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 6 приведено изображение страницы элементов третьей темы дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

Первое занятие проводится в форме теста по введению в квантовую оптику и электродинамику периодических структур. Второе занятие проводится в форме теса по

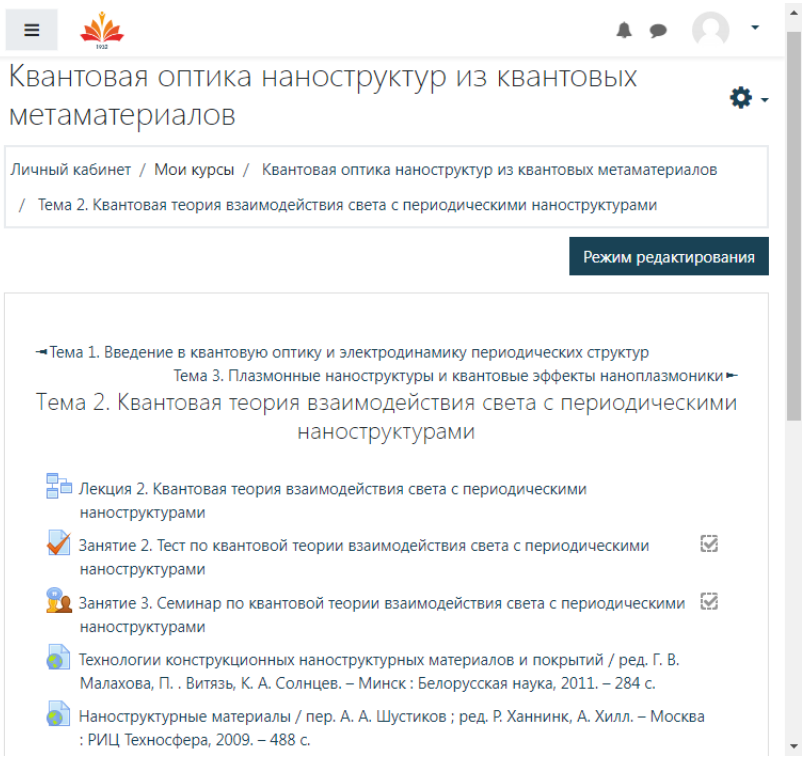


Рис. 5. Страница элементов второй темы дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE

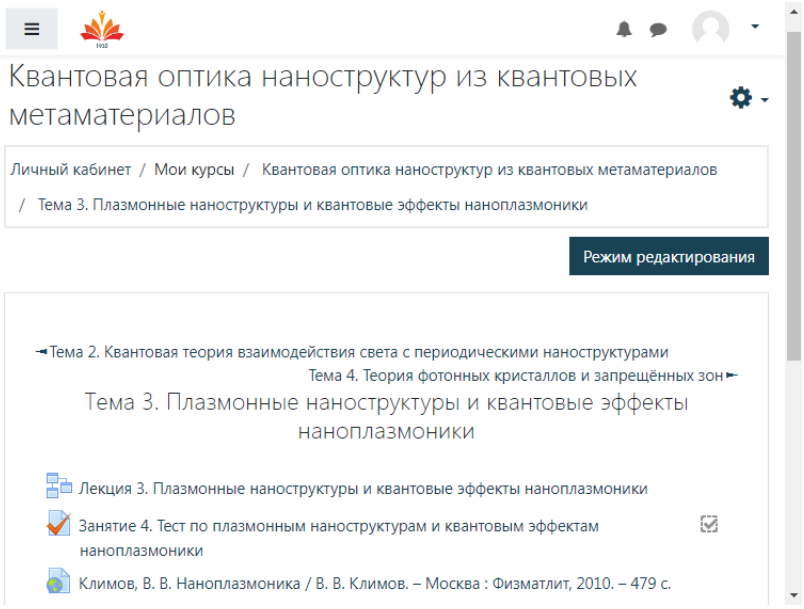


Рис. 6. Страница элементов третьей темы дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE

квантовой теории взаимодействия света с периодическими наноструктурами. Третье занятие проводится в форме семинара по квантовой теории взаимодействия света с периодическими наноструктурами. Четвёртое занятие проводится в форме теста по плазмонным наноструктурам и квантовым эффектам наноплазмоники. Пятое занятие проводится в форме теста по теории фотонных кристаллов и запрещённых зон. Шестое

занятие проводится в форме семинара по теории фотонных кристаллов и запрещённых зон. Седьмое занятие проводится в форме теста по нелинейным оптическим эффектам в периодических метаматериалах и машинному обучению в дизайне метаматериалов. Восьмое занятие проводится в форме первой контрольной работы. Девятое занятие проводится в форме теста по квантовым источникам света на основе метаматериалов. Десятое занятие проводится в форме семинара по квантовым источникам света на основе метаматериалов. Одиннадцатое занятие проводится в форме теста по квантовой информации и перспективам применения метаматериалов в квантовых компьютерах, связи, криптографии. Двенадцатое занятие проводится в форме теста по численным методам в квантовой оптике метаматериалов. Тринадцатое занятие проводится в форме семинара по численным методам в квантовой оптике метаматериалов. Четырнадцатое занятие проводится в форме теста по квантовым флуктуациям электромагнитного поля в нанощелях и эффекту Казимира в метаматериалах. Пятнадцатое занятие проводится в форме итоговой работы по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов.

Процесс разработки и педагогического проектирования дистанционного курса по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов подтвердил возможность успешного адаптации высоконаучного и междисциплинарного содержания в дистанционном формате, что требует не только качественного теоретического освещения тем, но и активного вовлечения студентов через интерактивные элементы и практические задания. Одним из ключевых достижений стало формирование логически последовательной структуры курса, где каждая тема, начиная от фундаментальных концепций квантовой электродинамики и теории Блоха и заканчивая передовыми направлениями квантовой информации и наноплазмоники, органично переходит к следующей, обеспечивая плавное усложнение материала и постепенное формирование научного мышления.

Важной особенностью дистанционного курса стала интеграция современных численных методов и программного обеспечения, что позволило не только теоретически объяснить физические процессы, но и предоставить студентам практический инструментарий для их моделирования. Особое внимание уделялось модулю по численным методам, где использование таких платформ, как COMSOL или специализированных библиотек языка Python, создало условия для развития навыков, востребованных в научно-исследовательской и промышленной сферах, что сделало курс более практико-ориентированным и актуальным для современных требований к специалистам в области нанофотоники и квантовых технологий.

Анализ процесса проектирования показал, что эффективное дистанционное обучение в области квантовой оптики невозможно без мультимедийной поддержки, включающей лекции, интерактивные симуляции и визуализацию сложных квантовых явлений, таких как формирование запрещённых зон в фотонных кристаллах или квантовые флуктуации в нанощелях. Такие материалы не только облегчают восприятие абстрактных концепций, но и компенсируют отсутствие непосредственного взаимодействия с преподавателем, делая курс доступным для студентов с разным уровнем подготовки.

Особого внимания в процессе проектирования требовала система контроля и оценки знаний, которая должна была одновременно проверять теоретическое понимание материала и практическое применение полученных навыков. Системный подход, включающий автоматизированные тесты, практические задания по моделированию и итоговый исследовательский проект, позволил оценить не только глубину усвоения материала, но и способность студентов критически анализировать научные данные и разрабатывать собственные решения, что является важным аспектом подготовки будущих исследователей и инженеров в области квантовых технологий.

Ещё один значимый вывод касается необходимости постоянного взаимодействия

между преподавателем и обучающимися в дистанционном формате, которое реализовывалось через асинхронные форумы для обсуждения научных статей, синхронные вебинары для разбора сложных вопросов и групповую работу над исследовательскими задачами. Такая система не только сохранила академическую атмосферу курса, но и способствовала формированию профессионального сообщества, что особенно важно для междисциплинарных и высокотехнологичных направлений.

Важным аспектом, выявленным в процессе разработки, стало необходимость непрерывного обновления и корректировки контента с учётом последних научных достижений, таких как разработка новых квантовых источников света на основе метаматериалов или применение метаматериалов в квантовых компьютерах и криптографии. Это подчеркивает динамичность курса и его способность оставаться востребованным в условиях быстро развивающихся технологий, что делает его не только образовательной платформой, но и инструментом для вовлечения студентов в актуальные научные исследования.

Наконец, использование системы управления обучением MOODLE в качестве основы для реализации курса продемонстрировало её гибкость и функциональность для комплексного дистанционного обучения, особенно в условиях, требующих интеграции разноформатных материалов и инструментов для оценки знаний. Грамотная настройка интерфейса, система уведомлений и возможность использования плагинов для автоматизации проверки заданий существенно упростили организационный процесс и повысили доступность курса для обучающихся. Это позволило сконцентрироваться на педагогическом проектировании и содержании, не отвлекаясь на технические проблемы, что в итоге повысило качество образовательного процесса.

Материалы первой лекции по введению в квантовую оптику и электродинамику периодических структур

Квантовая оптика наноструктур изучает взаимодействие света с веществом на микроскопическом уровне, где проявляются квантовые эффекты. Периодические структуры, такие как фотонные кристаллы, метаматериалы и диэлектрические решётки, демонстрируют уникальные оптические свойства, обусловленные когерентными эффектами и периодичностью потенциала. В основе описания оптических свойств этих систем лежит теория Блоха, которая связывает периодичность структуры с формированием зонной структуры для волновых функций. Изучение взаимодействия электромагнитного излучения с периодическими структурами составляет основу современной нанооптики и фотонных технологий. Периодические системы, такие как кристаллические решётки, фотонные кристаллы и метаматериалы, демонстрируют уникальные оптические свойства, которые невозможно объяснить в рамках классической волновой оптики. Теория Блоха, первоначально разработанная для описания электронов в кристаллах, оказывается мощным инструментом и для анализа электромагнитных волн в периодических средах. Рассмотрим основные физические принципы этой теории, выведем основные уравнения и проанализируем физический смысл уравнений.

Рассмотрим электромагнитное поле в сплошной среде с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon(\mathbf{r})$, периодической с вектором трансляции $\mathbf{R}$:

$$\varepsilon(\mathbf{r}+\mathbf{R}) = \varepsilon(\mathbf{r}) \ . \tag{1}$$

Эта периодичность означает, что свойства среды повторяются через каждый элементарный период. Для анализа электромагнитных волн в такой среде удобно использовать

комплексное представление поля:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r},t) = \mathrm{Re}\left[\mathbf{E}(\mathbf{r})\, e^{-i\omega t}\right] , \tag{2}$$

$$\mathbf{H}(\mathbf{r},t) = \mathrm{Re}\left[\mathbf{H}(\mathbf{r})\, e^{-i\omega t}\right] . \tag{3}$$

Подставляя эти выражения в уравнения Максвелла в отсутствие источников, получаем систему уравнений для амплитуд:

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}) = i\omega\mu \mathbf{H}(\mathbf{r}) , \\ \nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}) = -i\omega\varepsilon(\mathbf{r})\mathbf{E}(\mathbf{r}) . \end{cases} \tag{4}$$

Исключая $\mathbf{H}(\mathbf{r})$ через первое уравнение, приходим к волновому уравнению для электрического поля:

$$\nabla \times \left[\frac{1}{\varepsilon(\mathbf{r})} \nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r})\right] = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}) . \tag{5}$$

Это уравнение является аналогом уравнения Шрёдингера для электронов в периодическом потенциале.

Векторное волновое уравнение для электрического поля $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ в области без свободных зарядов:

$$\nabla^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}) - \nabla\left(\nabla \cdot \mathbf{E}(\mathbf{r})\right) + \varepsilon_0\mu_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2}\left(\varepsilon(\mathbf{r})\mathbf{E}(\mathbf{r})\right) = 0 . \tag{6}$$

Для монохроматического поля $\mathbf{E}(\mathbf{r},t) = \mathbf{E}(\mathbf{r})\, e^{-i\omega t}$ это уравнение сводится следующему уравнению

$$\nabla^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}) + \nabla\left(\frac{1}{\varepsilon(\mathbf{r})} \nabla \cdot \left(\varepsilon(\mathbf{r})\mathbf{E}(\mathbf{r})\right)\right) + \omega^2 \varepsilon_0 \mu_0 \varepsilon(\mathbf{r})\, \mathbf{E}(\mathbf{r}) = 0 . \tag{7}$$

Для изотропной среды с $\nabla \cdot \left(\varepsilon(\mathbf{r})\, \mathbf{E}(\mathbf{r})\right) = 0$ получаем упрощённое уравнение:

$$\nabla^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}) + \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon(\mathbf{r})\, \mathbf{E}(\mathbf{r}) = 0 , \tag{8}$$

где $c = 1/\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}$ – скорость света в вакууме.

Решения уравнения (7) в периодических структурах ищут в виде волновых пакетов Блоха:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}} \mathbf{u}_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}) , \tag{9}$$

где $\mathbf{u}_{\mathbf{k}}(\mathbf{r})$ – периодическая функция с периодом решётки:

$$\mathbf{u}_{\mathbf{k}}(\mathbf{r} + \mathbf{R}) = \mathbf{u}_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}) . \tag{10}$$

Подставляя (8) в (7), получаем уравнение для функции Блоха:

$$\left(\nabla^2 + 2i\mathbf{k} \cdot \nabla + \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon(\mathbf{r})\right) \mathbf{u}_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}) = 0 . \tag{11}$$

Для анализа свойств решений введём оператор $\mathcal{H}_{\mathbf{k}} = -\nabla^2 - \frac{\omega^2}{c^2}\varepsilon(\mathbf{r})$, однако в данном контексте удобнее рассматривать уравнение для волновой функции электрона в аналогичной периодической среде, чтобы проиллюстрировать обобщение.

Представим электрическое поле в виде волнового уравнения в представлении Блоха:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}) = \sum_{\mathbf{G}} \mathbf{E}_{\mathbf{k},\mathbf{G}} e^{i(\mathbf{k}+\mathbf{G})\cdot\mathbf{r}} , \tag{12}$$

где $\mathbf{E}_{\mathbf{k},\mathbf{G}}$ – амплитуды Фурье-компонент. Подстановка этого разложения в волновое уравнение даёт следующее уравнение:

$$\sum_{\mathbf{G}'} \left[|\mathbf{k}+\mathbf{G}|^2 \delta_{\mathbf{G},\mathbf{G}'} - k_0^2 \varepsilon_{\mathbf{G}-\mathbf{G}'} \right] \mathbf{E}_{\mathbf{k},\mathbf{G}'} = 0 \, . \tag{13}$$

Это матричное уравнение может быть записано в виде:

$$\mathbf{M}\left(\mathbf{k}\right) \mathbf{E}_{\mathbf{k}} = 0 \, , \tag{14}$$

где $\mathbf{M}\left(\mathbf{k}\right)$ – матрица с элементами:

$$M_{\mathbf{G},\mathbf{G}'}\left(\mathbf{k}\right) = |\mathbf{k}+\mathbf{G}|^2 \, \delta_{\mathbf{G},\mathbf{G}'} - k_0^2 \varepsilon_{\mathbf{G}-\mathbf{G}'} \, . \tag{15}$$

Ненулевые решения существуют только при выполнении условия:

$$\det \mathbf{M}\left(\mathbf{k}\right) = 0 \, . \tag{16}$$

Это уравнение определяет зависимость частоты ω от волнового вектора $\mathbf{k}$ и называется дисперсионным уравнением.

Зонная структура в электродинамике периодических сред имеет глубокий физический смысл. Разрешённые зоны соответствуют частотам, при которых электромагнитные волны могут распространяться в структуре, а запрещённые зоны соответствуют частотам, при которых распространение запрещено. На границах зон происходят резкие изменения дисперсионных характеристик, что приводит к уникальным оптическим эффектам.

Рассмотрим частицу в периодическом потенциале $V\left(\mathbf{r}\right)$ для аналогии с электродинамикой:

$$H = -\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 + V\left(\mathbf{r}\right) \, , \quad V\left(\mathbf{r}+\mathbf{R}\right) = V\left(\mathbf{r}\right) \, . \tag{17}$$

Волновые функции ищутся в виде:

$$\psi_{\mathbf{k}}\left(\mathbf{r}\right) = e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}} u_{\mathbf{k}}\left(\mathbf{r}\right) \, , \tag{18}$$

где $u_{\mathbf{k}}\left(\mathbf{r}\right)$ периодична с периодом решётки. Подстановка в уравнение Шрёдингера даёт:

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m} \left(\nabla + i\mathbf{k}\right)^2 + V\left(\mathbf{r}\right) \right) u_{\mathbf{k}}\left(\mathbf{r}\right) = E_{\mathbf{k}} u_{\mathbf{k}}\left(\mathbf{r}\right) \, . \tag{19}$$

Раскрывая квадрат, получаем следующее выражение:

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 + \frac{\hbar^2 k^2}{2m} + \frac{i\hbar^2}{m}\mathbf{k}\cdot\nabla + V\left(\mathbf{r}\right) \right) u_{\mathbf{k}}\left(\mathbf{r}\right) = E_{\mathbf{k}} u_{\mathbf{k}}\left(\mathbf{r}\right) \, . \tag{20}$$

Введём эффективный оператор Гамильтона для функции Блоха:

$$\mathcal{H}_{\mathbf{k}} = -\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 + \frac{i\hbar^2}{m}\mathbf{k}\cdot\nabla + V\left(\mathbf{r}\right) \, , \tag{21}$$

сдвинув энергию на $\hbar^2 k^2 / \left(2m\right)$:

$$\left(\mathcal{H}_{\mathbf{k}} + \frac{\hbar^2 k^2}{2m} \right) u_{\mathbf{k}}\left(\mathbf{r}\right) = E_{\mathbf{k}} u_{\mathbf{k}}\left(\mathbf{r}\right) \, . \tag{22}$$

Таким образом, энергия $E_{\mathbf{k}}$ включает волновой вектор $\mathbf{k}$ и зависящую от $\mathbf{k}$ энергию решётки:

$$E_{\mathbf{k}} = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} + \Delta E_{\mathbf{k}} \, , \tag{23}$$

где $\Delta E_{\mathbf{k}}$ – собственные значения оператора $\mathcal{H}_{\mathbf{k}}$.

Периодическая функция Блоха $u_{\mathbf{k}}(\mathbf{r})$ должна быть решением уравнения:

$$\mathcal{H}_{\mathbf{k}}\psi_{\mathbf{k}} = \left(E_{\mathbf{k}} - \frac{\hbar^2 k^2}{2m}\right)\psi_{\mathbf{k}} \,. \tag{24}$$

Спектр энергии $\Delta E_{\mathbf{k}}$ является периодической функцией обратной решётки:

$$\Delta E_{\mathbf{k}+\mathbf{G}} = \Delta E_{\mathbf{k}} \,, \tag{25}$$

где $\mathbf{G}$ – вектор обратной решётки. Это приводит к образованию зон Бриллюэна — областей в пространстве волновых векторов, где энергия изменяется непрерывно.

В одномерном случае уравнение Блоха для функции $u_k(x)$ принимает следующий вид:

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m}\frac{d^2}{dx^2} + V(x)\right)u_k(x) + \frac{i\hbar^2 k}{m}\frac{du_k}{dx} + \frac{\hbar^2 k^2}{2m}u_k(x) = E_k u_k(x) \,. \tag{26}$$

Используя периодичность $V(x+a) = V(x)$, где a – период решётки, ищем решения вида:

$$u_k(x+a) = u_k(x)\, e^{ika} \,. \tag{27}$$

Пусть $u_k(x) = e^{-ikx}\psi(x)$, где $\psi(x+a) = \psi(x)$. Тогда получаем уравнение для $\psi(x)$:

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m}\frac{d^2}{dx^2} + V(x)\right)\psi(x) = \left(E_k - \frac{\hbar^2 k^2}{2m}\right)\psi(x) \,. \tag{28}$$

Это уравнение совпадает с уравнением Шрёдингера для частицы в потенциале $V(x)$, но сдвигом энергии.

Введём оператор энергии в кристалле:

$$E(\mathbf{k}) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} + E_n(\mathbf{k}) \,, \tag{29}$$

где $E_n(\mathbf{k})$ – дискретные значения энергии для n-ой зоны. Вектор $\mathbf{k}$ изменяется в первой зоне Бриллюэна. Для границ зоны Бриллюэна выполняется условие:

$$E(\mathbf{k}+\mathbf{G}) = E(\mathbf{k}) \,. \tag{30}$$

В результате образуются разрешённые и запрещённые зоны энергий. В оптике аналогично формируются разрешенные и запрещённые полосы частот для распространения электромагнитных волн.

В случае периодических диэлектрических структур уравнение для электромагнитных волн принимает вид:

$$\nabla^2\mathbf{E}(\mathbf{r}) + \omega^2\varepsilon(\mathbf{r})\,\mu_0\mathbf{E}(\mathbf{r}) = 0 \,. \tag{31}$$

Используя подстановку Блоха (8), получаем уравнение для функции $\mathbf{u}_{\mathbf{k}}(\mathbf{r})$:

$$\nabla^2\mathbf{u}_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}) + 2i\mathbf{k}\cdot\nabla\mathbf{u}_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}) - k^2\mathbf{u}_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}) + \omega^2\varepsilon(\mathbf{r})\,\mu_0\mathbf{u}_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}) = 0 \,. \tag{32}$$

Перепишем это уравнение в виде:

$$\mathcal{H}_{\mathbf{k}}\mathbf{u}_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}) = \omega^2\varepsilon_0\mu_0 Q_{\mathbf{k}}\mathbf{u}_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}) \,, \tag{33}$$

где $Q_{\mathbf{k}} = \frac{\omega^2\varepsilon_0\mu_0 - k^2}{\omega^2\varepsilon_0\mu_0}$ – нормированная энергия, соответствующая частоте ω. Решение этого уравнения приводит к спектру частот ω, разрешенных для распространения в

периодической структуре. Запрещённые зоны соответствуют частотам, при которых волны не могут распространяться, аналогично запрещенным зонам для электронов в кристаллах.

Рассмотрим одномерный фотонный кристалл с чередующимися слоями диэлектриков с диэлектрическими проницаемостями ε_1 и ε_2, толщинами d_1 и d_2 соответственно. Для нормальной падающей волны с волновым вектором k уравнения Максвелла в слоях описываются:

$$E_z(x) = \begin{cases} Ae^{ik_1 x} + Be^{-ik_1 x}, & \text{в слое } \varepsilon_1 \ , \\ Ce^{ik_2 x} + De^{-ik_2 x}, & \text{в слое } \varepsilon_2 \ , \end{cases} \tag{34}$$

где $k_{1,2} = \omega\sqrt{\varepsilon_{1,2}\mu_0}$.

Применим граничные условия в точках $x = n(d_1 + d_2)$:

$$E\left(0^+\right) = E\left(0^-\right) \ , \quad \frac{1}{\varepsilon_1}\frac{dE}{dx}\Big|_{0^+} = \frac{1}{\varepsilon_2}\frac{dE}{dx}\Big|_{0^-} \ . \tag{35}$$

Решение этих условий для периодической структуры приводит к условию периодичности Блоха для амплитуд:

$$\begin{pmatrix} A \\ B \end{pmatrix}_n = e^{i\kappa(d_1+d_2)} \begin{pmatrix} A \\ B \end{pmatrix}_{n+1} \ , \tag{36}$$

где κ – волновой вектор Блоха. Условие существования нетривиальных решений даёт дисперсионное уравнение для зон:

$$\cos(\kappa a) = \cos(k_1 d_1)\cos(k_2 d_2) - \frac{1}{2}\left(\frac{\varepsilon_1 k_2}{\varepsilon_2 k_1} + \frac{\varepsilon_2 k_1}{\varepsilon_1 k_2}\right)\sin(k_1 d_1)\sin(k_2 d_2) \ . \tag{37}$$

Решение этого уравнения для различных ω даёт зоны разрешённых частот.

В трёхмерном случае зонная структура материала становится более сложной. Поверхности постоянной энергии в обратном пространстве формируют зоны Бриллюэна, аналогично случаю электронов в кристаллах. На границах зон Бриллюэна происходят резкие изменения дисперсионных соотношений, что приводит к формированию запрещённых зон.

Теория Блоха играет ключевую роль в описании оптических свойств периодических структур, аналогично её применению в квантовой механике. Зонная структура формирует запрещённые полосы для распространения электромагнитных волн в фотонных кристаллах, что позволяет контролировать распространение света на наноуровне. Метаматериалы, фотонные волноводы и оптоэлектронные устройства нового поколения основаны на этих принципах. Основные уравнения теории включают:

$$\nabla^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}) + \frac{\omega^2}{c^2}\varepsilon(\mathbf{r})\,\mathbf{E}(\mathbf{r}) = 0 \ , \tag{38}$$

$$\mathcal{H}_{\mathbf{k}} u_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}) = \left(E_{\mathbf{k}} - \frac{\hbar^2 k^2}{2m}\right) u_{\mathbf{k}}(\mathbf{r}) \ , \tag{39}$$

$$\cos(\kappa a) = \cos(k_1 d_1)\cos(k_2 d_2) - \frac{1}{2}\left(\frac{\varepsilon_1 k_2}{\varepsilon_2 k_1} + \frac{\varepsilon_2 k_1}{\varepsilon_1 k_2}\right)\sin(k_1 d_1)\sin(k_2 d_2) \ . \tag{40}$$

Эти результаты демонстрируют тесную связь между квантовой механикой и классической электродинамикой в периодических структурах, что позволяет разрабатывать новые оптические материалы и устройства с заданными физическими свойствами. Теория Блоха является мощным инструментом для описания электромагнитных волн в периодических структурах. Теория Блоха позволяет объяснить такие физические явления,

как зонная структура фотонных кристаллов, полные запрещённые зоны для фотонов и формирование поверхностных состояний на границах фотонных кристаллов. Теория Блоха позволяет описывать сложные оптические явления, такие как зонная структура, фотонные запрещённые зоны и дифракция от кристаллических решёток. Понимание этих принципов открывает возможности для создания новых оптических материалов и устройств с заданными физическими свойствами. Периодичность диэлектрической проницаемости приводит к образованию зонной структуры в спектре электромагнитных волн. Теория Блоха находит широкое применение в современной оптике и фотонных технологиях, что делает её одной из ключевых концепций современной физики.

Заключение

Описан процесс разработки дистанционного курса, охватывающего ключевые аспекты физики метаматериалов. Дистанционный курс по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов разработан с помощью инструментария системы управления обучением MOODLE.

Выводы по работе можно сформулировать следующим образом:

1. показано, что при помощи модульной технологии разработан специализированный дистанционный курс, охватывающий ключевые аспекты физики и технологии наноструктур из квантовых метаматериалов,
2. разработанный дистанционный курс по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов готов к использованию в образовательном процессе педагогического университета на педагогическом направлении подготовки с профилями по физике и математике, или физике и информатике.

Задачи работы решены полностью.

Гипотеза научного исследования, заключающаяся в том, что если использовать теоретические модели физических процессов в квантовых точках и результаты численных расчётов физических характеристик квантовых точек в дистанционном курсе по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов, то можно создать специализированный дистанционный курс, опирающийся на современные представления о физических свойствах наноструктур из квантовых метаматериалов, который повысит уровень компетенций обучающихся в области физики наноструктур из квантовых метаматериалов и упростит доступ к актуальным знаниям, подтверждена полностью.

Дистанционный курс по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов построен с использованием модульной технологии построения курса, что позволяет эффективно управлять темпом продвижения по курсу по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов и применять смешанную технологию в преподавании физики и технологии квантовых метаматериалов. Теоретические материалы курса систематизировали и актуализировали знания о квантовых метаматериалах. Курс по квантовой оптике наноструктур из квантовых метаматериалов интегрирован в образовательные платформы педагогического университета и планируется к использованию в образовательных программах бакалавриата и специалитета.

Список использованных источников

1. Алтунин 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.

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 нанофизике 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 нанокомпозитных материалов в курсе по оптике тонкослойных и наноструктурных покрытий // Наука online. — 2022. — № 2 (19). — С. 18–30. — URL: https://elibrary.ru/wgfhkb.

5. Алтунин 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.

6. Алтунин К. К., Петрова Е. А. Разработка модульной структуры дистнционного курса «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. Тимченко В. М. Проектирование дистанционного курса по физике мезоскопических систем // Наука online. — 2023. — № 4 (25). — С. 80–90. — URL: http://nauka-online.ru/wp-content/uploads/2024/01/04252023-005.pdf.

9. Илюшкина Е. А. Разработка дистанционного курса по радиотехническим устройствам в школе // Наука online. — 2024. — № 4 (29). — С. 60–72. — URL: http://nauka-online.ru/wp-content/uploads/2024/12/04292024-006.pdf.

10. Павлова Е. С. Разработка дистанционного курса по квантовым точкам // Наука online. — 2025. — № 4 (33). — С. 1–21. — URL: http://nauka-online.ru/wp-content/uploads/2025/12/04332025-001.pdf.

Сведения об авторах:

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

E-mail: kat.pavlova2003@icloud.com

ORCID iD 0009-0009-1344-1431

Web of Science ResearcherID ISA-2133-2023

Original article
PACS 01.40.Di
OCIS 000.2060
MSC 78A10

Pedagogical design of a distance learning course on quantum optics of nanostructures from quantum metamaterials in the learning management system MOODLE

E. S. Pavlova

Ulyanovsk State Pedagogical University, 432071, Ulyanovsk, Russia

Submitted May 11, 2026
Resubmitted May 12, 2026
Published June 30, 2026

Abstract. The development process of a distance learning course covering key aspects of metamaterial physics is described. This distance learning course on quantum optics of quantum metamaterial nanostructures was developed using the learning management system MOODLE. Using modular technology, a specialized distance learning course was developed covering key aspects of the physics and technology of quantum metamaterial nanostructures. This distance learning course on quantum optics of quantum metamaterial nanostructures was designed using modular course design technology, enabling effective pace management and the application of blended technology in teaching the physics and technology of quantum metamaterials. The theoretical materials of the course systematized and updated knowledge about quantum metamaterials. This course on quantum optics of quantum metamaterial nanostructures has been integrated into the educational platforms of the pedagogical university and is planned for use in undergraduate and specialist degree programs.

Keywords: course, distance learning course, quantum optics, nanostructure optics, metamaterial, modular technology, learning management system

References

1. Altunin K. K., Kolesova T. A. Development of distance learning course elements on physical nanoelectronics in the learning management system MOODLE // 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 learning management system MOODLE // 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 spasers 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 // Science online. — 2019. — no. 2 (7). — P. 15–32. — URL: https://elibrary.ru/omnoyk.

8. Timchenko V. M. Designing a distance learning course on the physics of mesoscopic systems // Science online. — 2023. — no. 4 (25). — P. 80–90. — URL: http://nauka-online.ru/wp-content/uploads/2024/01/04252023-005.pdf.

9. Ilyushkina E. A. Development of a distance learning course on radio-engineering devices at school // Science online. — 2024. — no. 4 (29). — P. 60–72. — URL: http://nauka-online.ru/wp-content/uploads/2024/12/04292024-006.pdf.

10. Pavlova E. S. Development of a distance learning course on quantum dots // Science online. — 2025. — no. 4 (33). — P. 1–21. — URL: http://nauka-online.ru/wp-content/uploads/2025/12/04332025-001.pdf.

Information about authors:

Ekaterina Sergeevna Pavlova — 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: kat.pavlova2003@icloud.com

ORCID iD 0009-0009-1344-1431

Web of Science ResearcherID ISA-2133-2023

Научная статья
УДК 372.853
ББК 74.489
ГРНТИ 14.35.09
ВАК 5.8.2.
PACS 01.40.Di
OCIS 000.2060
MSC 78A48

Педагогическое проектирование дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями в системе управления обучением MOODLE

А. А. Родионова [1]

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

Поступила в редакцию 11 мая 2026 года
После переработки 12 мая 2026 года
Опубликована 30 июня 2026 года

Аннотация. Целью работы является исследование процесса разработки дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями, направленного на формирование у обучающихся компетенций в области фотоники и нанооптики с использованием современных цифровых технологий. Мотивация исследования обусловлена необходимостью адаптации образовательных процессов к цифровой среде. В работе используются методы разработки дистанционных курсов. Результаты исследования включают создание структуры курса нанооптики нанокомпозитов с нановключениями, подбор теоретических материалов курса. Практическая значимость исследования заключается в возможности применения разработанного курса нанооптики нанокомпозитов в образовательных учреждениях.

Ключевые слова: курс, дистанционный курс, нанооптика, нанокомпозит, наноразмерное включение, модуль, система управления обучением

Введение

Современные технологии требуют специалистов в области фотоники, нанооптики и наноэлектроники, но традиционные методы обучения не всегда доступны для удалённых студентов. Дистанционные курсы решают эту проблему, обеспечивая гибкость и интерактивность. Данный курс отвечает вызовам цифровизации образования на подготовку квалифицированных педагогических кадров.

Целью работы является исследование процесса разработки дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями, направленного на формирование у обучающихся компетенций в области фотоники и нанооптики с использованием современных цифровых технологий. Для достижения указанной цели в работе поставлена

[1] E-mail: rod_nastay_0000@mail.ru

задача исследования по разработке структуры и избранных элементов дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов в системе управления обучением MOODLE, включая теоретические модули, практические задания по нанооптике нанокомпозитов.

Объектом исследования является процесс обучения оптике наноструктур с применением дистанционных образовательных технологий. Предметом исследования является система методологических и технологических аспектов разработки дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями.

Методами исследования являются компьютерные методы разработки дистанционных курсов, анализ научной литературы по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями. Материалами исследования являются платформа для дистанционного обучения MOODLE, научные публикации по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями.

Научная новизна исследования заключается в том, что разработана авторская методика преподавания нанооптики нанокомпозитов в дистанционном формате.

Гипотеза научного исследования заключается в том, что если использовать дистанционный курс по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями, то повысится доступность и качество обучения нанооптике за счёт применения дистанционных технологий и практико-ориентированных методов обучения нанооптике.

Теоретическая значимость исследования заключается в том, что исследование расширяет методологическую базу дистанционного обучения в сфере фотоники и нанооптики, систематизирует подходы к моделированию оптических процессов в наноматериалах и предлагает новые принципы организации образовательного процесса. Практическая значимость исследования заключается в том, что дистанционный курс нанооптики нанокомпозитов с нановключениями может быть использован в вузах и научных центрах для подготовки специалистов в области фотоники, нанооптики и нанотехнологий.

Технология дистанционного обучения становится всё более популярной и востребованной образовательной технологией в условиях непрерывного развития современных образовательных технологий с учётом возможностей Интернета и видеоконференцсвязи. Технологии дистанционного обучения позволяют успешно использовать их для достижения высоких результатов в изучении фотоники, нанооптики и нанотехнологий.

Базой исследования для создания дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями в системе управления обучением MOODLE является образовательный портал ФГБОУ ВО «УлГПУ им. И. Н. Ульянова».

Проектирование структуры дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями в системе управления обучением MOODLE

Общая трудоёмкость дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями составляет 4 зачетные единицы или 144 часа.

Первая тема дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями посвящена изучению физических основы нанооптики и физических принципов взаимодействия света с нанообъектами. Вторая тема дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями посвящена изучению металл-диэлектрических нанокомпозитов с металлическими нановключениями с учётом плазмонных эффектов. Третья тема дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями посвящена изучению локализованных плазмонных резонансов в металлических нановключениях. Четвёртая тема дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями посвящена изучению металл-диэлектрических нанокомпозитов с диэлектрическими нановключениями и фотонными кристаллами. Пятая тема дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями посвящена изучению

гибридных нанокомпозитов с экзотическими оптическими свойствами. Шестая тема дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями посвящена изучению полупроводниковых нанокомпозитов с полупроводниковыми нановключениями и квантово-размерных эффектов. Седьмая тема дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями посвящена изучению нелинейной оптики нанокомпозитов и метаматериалов. Восьмая тема дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями посвящена изучению магнитооптики, спинтронных нанокомпозитов и спинтроники на наноуровне. Девятая тема дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями посвящена изучению термооптики нанокомпозитов. Десятая тема дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями посвящена изучению методов моделирования в нанооптике. Одиннадцатая тема дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями посвящена изучению экспериментальных методов исследования нанокомпозитов. Двенадцатая тема дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями посвящена изучению современных технологий и перспектив применения нанокомпозитов в оптоэлектронике.

Разработка дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями в системе управления обучением MOODLE представляет собой многоэтапный процесс, начинающийся с анализа целевой аудитории и потребностей образования. На первом этапе формируется концепция курса, определяются его цели и задачи, проводится анализ современных подходов к обучению нанооптике, а также оцениваются аналогичные образовательные программы. Далее разрабатывается структура курса, включающая логичное распределение модулей, тем и практических заданий, которые должны постепенно усложняться, обеспечивая системное освоение материала. Затем создаётся учебно-методическое обеспечение дистанционного курса по нанооптике: лекции, презентации, видеоуроки, интерактивные материалы и дополнительные ресурсы, адаптированные для дистанционного формата настройки совместимости с платформой MOODLE. После подготовки контента курс загружается в систему, где каждому модулю присваиваются элементы в виде лекций, тестов, заданий и форумов для обсуждений. На этом этапе важна настройка автоматической проверки заданий, системы оценивания и обратной связи, что повышает эффективность обучения. Далее проводится тестирование функциональности курса: проверяется корректность отображения материалов, работа интерактивных элементов и техническая стабильность интеграции с модельными программами. После устранения выявленных недостатков курс апробируется на фокус-группе студентов и преподавателей, собирается их обратная связь, которая позволяет доработать содержание и методику подачи материала. Завершающим этапом становится официальный запуск курса и его масштабирование на целевую аудиторию, включая студентов вузов, аспирантов и специалистов, занимающихся нанотехнологиями. Одновременно внедряются инструменты мониторинга успеваемости и аналитики, позволяющие оценивать прогресс обучающихся и вносить дальнейшие корректировки. Постоянное обновление курса с учётом новых научных достижений в области наноматериалов и совершенствования цифровых обучающих технологий позволяет поддерживать его актуальность и эффективность в долгосрочной перспективе.

Разработка курса нанооптики нанокомпозитов с нановключениями требует системного подхода, включающего анализ целевой аудитории, структурирование учебного материала, выбор цифровых инструментов и разработку механизмов обратной связи. На первом этапе необходимо провести анализ образовательных потребностей и требований учебного плана, ориентированного на магистрантов и аспирантов в области физики, материаловедения и оптоэлектроники. Учитывая сложность тематики, важно определить базовые знания, которыми должны обладать слушатели, а также выявить пробелы в

их подготовке, например, недостаточную осведомлённость в методах численного моделирования или экспериментальных техниках.

Следующим шагом становится формирование концепции курса с учётом его объёма (4 зачётных единицы) и междисциплинарного характера. На этом этапе разрабатывается логическая последовательность тем, начиная с вводных разделов по основам нанооптики и заканчивая передовыми приложениями в оптоэлектронике, что позволяет слушателям постепенно усваивать материал от теоретических основ до практических приложений. Особое внимание уделяется балансу между теоретическими аспектами и прикладными задачами, чтобы курс удовлетворял современным научным и инженерным вызовам.

Далее следует разработка детального содержания каждой темы дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями, включая определение ключевых понятий, формулировку учебных вопросов и выбор методов изложения материала. Например, в разделе о локализованных плазмонных резонансах необходимо проработать как физические принципы, описываемые уравнениями Ми и их модификациями, так и практические примеры применения в сенсорике, что позволяет слушателям увидеть прямую связь теории с реальными задачами. Для тем, связанных с моделированием и экспериментом, важно включить примеры из реальных исследований, а также указать на актуальные программные инструменты (Python, Octave) и лабораторное оборудование.

На следующем этапе осуществляется проектирование мультимедийного контента, который должен быть адаптирован для дистанционной формы обучения. Это включает создание лекционных материалов, разбитых на логические блоки (например, от 10 до 15 минут), с использованием анимаций для визуализации сложных физических процессов, таких как локализация плазмонов или формирование запрещённых зон в фотонных кристаллах. Параллельно разрабатываются интерактивные симуляции, например, моделирование спектров поглощения нанокомпозитов в зависимости от геометрии нановключений, что позволяет слушателям экспериментировать с параметрами и сразу видеть результаты. Для практических занятий создаются инструктивные материалы с пошаговыми руководствами по работе с программным обеспечением, включая примеры кода на Python для расчёта плазмонных мод или обработки спектроскопических данных.

Одновременно разрабатывается система оценки и контроля знаний, учитывающая особенности дистанционной формы обучения. Помимо традиционных тестов и экзаменационных вопросов, вводятся интерактивные задания, например, анализ спектральных данных или моделирование оптических свойств гибридных нанокомпозитов в специализированных программах. Для мотивации слушателей используются проектные работы, где студенты разрабатывают собственные нанокомпозиты с заданными оптическими свойствами, а также готовится форум для обсуждения актуальных научных статей, что способствует формированию исследовательских навыков. Важно предусмотреть регулярную обратную связь через анкеты и опросы, чтобы корректировать курс в реальном времени на основе отзывов слушателей.

На этапе технической реализации дистанционного курса по нанооптике подбирается и тестируется платформа для размещения контента, такая как система управления обучением MOODLE, а также интегрируются инструменты для проведения вебинаров и видеоконференций. Разрабатывается инструкция по использованию платформы для слушателей, включающая пошаговые рекомендации по регистрации, просмотру лекций и выполнению заданий. Особое внимание уделяется доступности курса для слушателей с ограниченными возможностями, например, предоставлению субтитров к видео и альтернативных форматов учебных материалов.

После технической подготовки проводится пилотное тестирование курса с ограниченной группой слушателей, что позволяет выявить и устранить возможные недочёты в структуре курса, понятности материалов и функциональности платформы. На основе результатов пилотного тестирования вносятся коррективы в содержание, добавляются дополнительные примеры или уточняются формулировки. Также анализируется эффективность системы контроля и при необходимости вносятся изменения для повышения объективности оценки знаний по оптике нанокомпозитов.

Далее реализуется запуск курса в тестовом режиме для выявления возможных сбоев в работе платформы и адаптации слушателей к дистанционной форме обучения. На этом этапе важно обеспечить поддержку для студентов через чаты, электронную почту и консультации в режиме реального времени. Также разрабатывается график консультаций, где преподаватели доступны для обсуждения сложных тем и индивидуальных проектов.

После успешного пилотного запуска курс вводится в постоянный режим работы, сопровождаемый непрерывным совершенствованием материалов курса с учётом новых научных достижений в области нанооптики и наноматериалов. Например, ежегодно добавляются разделы о новых методах моделирования или экспериментальных техниках, а также обновляются примеры приложений в оптоэлектронике. Важно поддерживать связь с научным сообществом, приглашая экспертов для вебинаров или мастер-классов, что повышает актуальность и престижность курса.

На завершающем этапе разрабатывается механизм сертификации слушателей, который подтверждает их готовность к практическому применению полученных знаний. Сертификат может включать результаты итогового экзамена, выполненных проектов и активного участия в обсуждениях. Также проводится мониторинг эффективности курса через анкеты среди выпускников, анализируются отзывы о качестве обучения и востребованности полученных навыков на рынке труда или в научной среде. На основе полученных данных курс постоянно совершенствуется для соответствия современным требованиям и интересам слушателей.

Проектирование дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями требует системного подхода, направленного на формирование как фундаментальных физических знаний, так и практических навыков, необходимых для научной деятельности. Первый этап заключается в анализе образовательных потребностей целевой аудитории — студентов, аспирантов, молодых исследователей и специалистов в области фотоники, материаловедения и нанотехнологий. На этом этапе необходимо определить уровень предварительной подготовки участников курса, их научные интересы и специфические задачи, которые они стремятся решить в рамках обучения, а также учесть, что дистанционный формат предполагает самостоятельную работу с высокой степенью ответственности за освоение материала.

Следующим шагом становится разработка образовательных целей и компетенций, которые должны быть сформированы в результате прохождения курса. Курс рассчитан на 4 зачётные единицы, что соответствует 144 академическим часам, поэтому необходимо сбалансировать объём теоретического материала и практических заданий так, чтобы слушатели не только усвоили принципы нанооптики, но и получили навыки моделирования и анализа экспериментальных данных. Основная цель заключается в формировании способности к самостоятельному исследовательскому анализу нанокомпозитов, включая понимание их оптических свойств, методов их модификации и практического применения в современных технологиях. Важно, чтобы слушатели научились критически оценивать научные публикации, интерпретировать результаты моделирования и планировать эксперименты.

На следующем этапе осуществляется структурирование содержания дистанционно-

го курса по нанооптике с учётом логической последовательности и взаимосвязи тем. Основы нанооптики и взаимодействия света с нанообъектами (Тема 1) должны заложить фундамент для последующего изучения специфических классов нанокомпозитов — от металл-диэлектрических систем с плазмонными эффектами (Тема 2, 3) до гибридных структур с экзотическими оптическими свойствами (Тема 5). Переход от классических моделей к современным направлениям, таким как нелинейная оптика (Тема 7) или спинтроника (Тема 8), должен быть постепенным и мотивированным актуальностью изучаемых явлений. Особое внимание стоит уделить темам, посвящённым методам моделирования (Тема 10) и экспериментальным техникам (Тема 11), так как они обеспечивают прикладную направленность курса и готовят слушателей к реальной исследовательской работе.

Одновременно с разработкой тематического плана осуществляется проектирование форм и методов обучения, оптимизированных для дистанционного взаимодействия. Теоретический материал может быть представлен в виде видеолекций, научных статей с комментариями преподавателя, интерактивных презентаций и текстовых модулей, адаптированных для самостоятельного изучения. Однако ключевым элементом становятся практические занятия, которые включают выполнение задач по моделированию оптических свойств нанокомпозитов с использованием специализированного программного обеспечения, анализ экспериментальных данных и решение проектных заданий. Важно предоставить слушателям не только методические рекомендации, но и примеры типичных ошибок, а также шаблоны для оформления результатов, что облегчит процесс освоения сложного материала.

Следующий этап посвящён разработке системы контроля и оценки знаний, которая должна быть многоуровневой и разнообразной. Проверка теоретических знаний может осуществляться через тесты с автоматизированной оценкой, а также через серию письменных работ и эссе, где слушатели анализируют актуальные научные статьи или разрабатывают концепцию исследования. Практические навыки оцениваются через выполнение лабораторных работ в виртуальных средах, моделирование физических процессов и защиту проектов, посвящённых разработке нанокомпозитов с заданными свойствами. Особое значение имеет рефлексивный компонент — обсуждение полученных результатов на форумах, участие в вебинарах и индивидуальные консультации с преподавателем, что позволяет слушателям получить обратную связь и скорректировать свои подходы к обучению.

Не менее важным становится проектирование системы мотивации и поддержки слушателей, которая учитывает специфику дистанционного обучения. Для этого необходимо создать условия для активного взаимодействия между участниками курса — например, организовать групповые проекты, где слушатели из разных регионов совместными усилиями решают исследовательские задачи. Также полезно внедрять элементы геймификации, такие как рейтинговые системы, награждение за активное участие в обсуждениях или выполнение заданий выше базового уровня. Одновременно важно обеспечивать техническую и методическую поддержку, включая разъяснения по работе с платформой MOODLE, консультации по использованию программного обеспечения и помощь в решении типичных проблем, возникающих при самостоятельном обучении.

На следующем этапе осуществляется подбор и адаптация учебных и методических материалов, которые будут использоваться в курсе. Это включает не только создание авторских лекционных материалов и интерактивных модулей, но и отбор современных научных публикаций, видеолекций от ведущих специалистов в области нанооптики, а также примеров реальных прикладных задач. Особое внимание стоит уделить материалам, которые демонстрируют связь теории с практикой — например, кейсы из промышленных или академических исследований, где нанокомпозиты находят приме-

нение в оптоэлектронике, сенсорике или медицине. Также необходимо предусмотреть материалы для самообразования, которые помогут слушателям углубить свои знания после прохождения основной программы курса.

В процессе разработки курса параллельно проводится техническая и организационная настройка платформы MOODLE, включая создание курса с логически выстроенной навигацией, настройку автоматических систем проверки заданий и интеграцию внешних инструментов, таких как видеопроигрыватели, системы моделирования или облачные лаборатории. Важно предусмотреть возможности для адаптации контента под разные уровни подготовки слушателей — например, через дополнительные материалы для углублённого изучения или упрощённые версии заданий для новичков. Также необходимо предусмотреть механизмы архивирования и обновления курса, чтобы в дальнейшем можно было легко вносить изменения в соответствии с новыми научными данными или отзывами слушателей.

Одним из ключевых этапов является пилотное тестирование курса с привлечением небольшой группы тестовых слушателей, которые смогут выявить слабые места в структуре курса, понятности материалов и эффективности методов обучения. На основе их отзывов и результатов промежуточных оценок осуществляется доработка контента, корректировка сроков выполнения заданий и уточнение критериев оценивания. Этот этап позволяет не только выявить технические проблемы в работе платформы, но и скорректировать педагогические подходы с учётом реальных трудностей, с которыми сталкиваются слушатели при освоении сложного материала.

Завершающим этапом становится разработка механизмов мониторинга и постоянного улучшения курса. После запуска основной версии курса необходимо установить систему сбора обратной связи от слушателей, включая анкетирование, интервью и анализ обсуждений на форумах. На основе этой информации будет проводиться регулярная модернизация курса — добавление новых тем, обновление примеров и заданий, а также внесение изменений в методику преподавания. Особое внимание стоит уделить анализу успеваемости и результативности обучения, чтобы выявить, какие темы или методы требуют дополнительного внимания. Также важно поддерживать связь с выпускниками курса, чтобы понять, как полученные знания и навыки применяются на практике, и какие аспекты обучения требуют дальнейшего совершенствования.

Таким образом, педагогическое проектирование дистанционного курса представляет собой итеративный процесс, где каждый этап взаимосвязан с другими и направлен на достижение единой цели — формирование высококвалифицированных специалистов в области нанооптики, способных внести вклад в развитие современных технологий. Успешная реализация курса требует не только глубокого знания предметной области, но и владения современными педагогическими технологиями и инструментами дистанционного обучения.

Результаты разработки структуры и элементов дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями в системе управления обучением MOODLE

Первая лекция дистанционного курса нанооптики нанокомпозитов с нановключениями посвящена изучению физических основ нанооптики и физических принципов взаимодействия света с нанообъектами. Вторая лекция дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями посвящена изучению металл-диэлектрических нанокомпозитов с металлическими нановключениями с учётом плазмонных эффектов. Третья лекция дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями посвящена изучению локализованных плазмонных резонансов в металлических

нановключениях. Четвёртая лекция дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями посвящена изучению металл-диэлектрических нанокомпозитов с диэлектрическими нановключениями и фотонными кристаллами. Пятая лекция дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями посвящена изучению гибридных нанокомпозитов с экзотическими оптическими свойствами. Шестая лекция дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями посвящена изучению полупроводниковых нанокомпозитов с полупроводниковыми нановключениями и квантово-размерных эффектов. Седьмая лекция дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями посвящена изучению нелинейной оптики нанокомпозитов и метаматериалов. Восьмая лекция дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями посвящена изучению магнитооптики, спинтронных нанокомпозитов и спинтроники на наноуровне. Девятая лекция дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями посвящена изучению термооптики нанокомпозитов. Десятая лекция дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями посвящена изучению методов моделирования в нанооптике. Одиннадцатая лекция дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями посвящена изучению экспериментальных методов исследования нанокомпозитов. Двенадцатая лекция дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями посвящена изучению современных технологий и перспектив применения нанокомпозитов в оптоэлектронике.

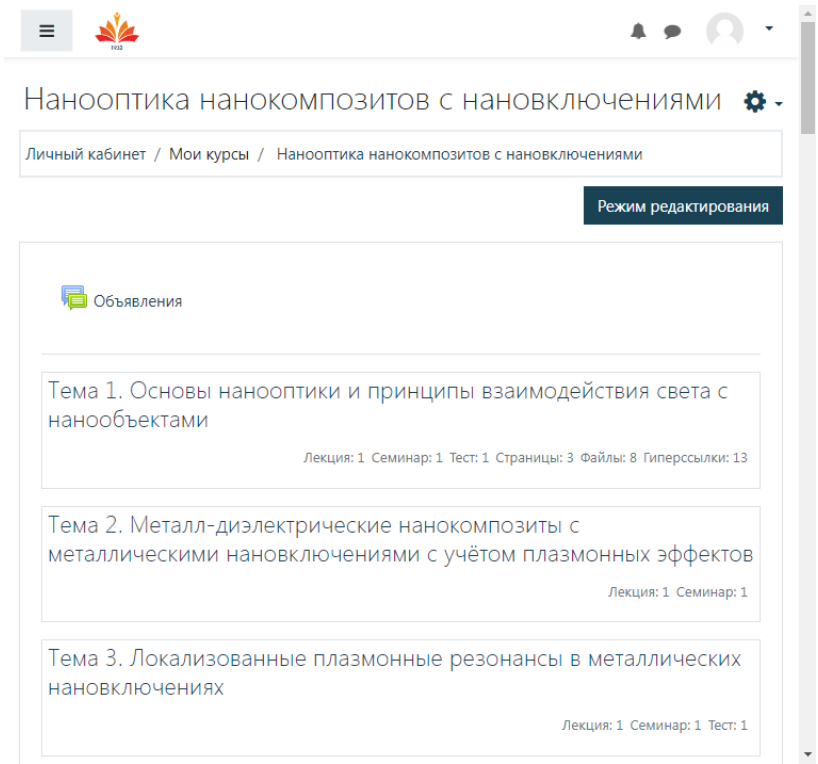


Рис. 1. Страница тематических модулей первой зачётной единицы дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE

На рис. 1 приведено изображение страницы тематических модулей первой зачётной единицы дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 2 приведено изображение страницы тематических модулей второй зачётной

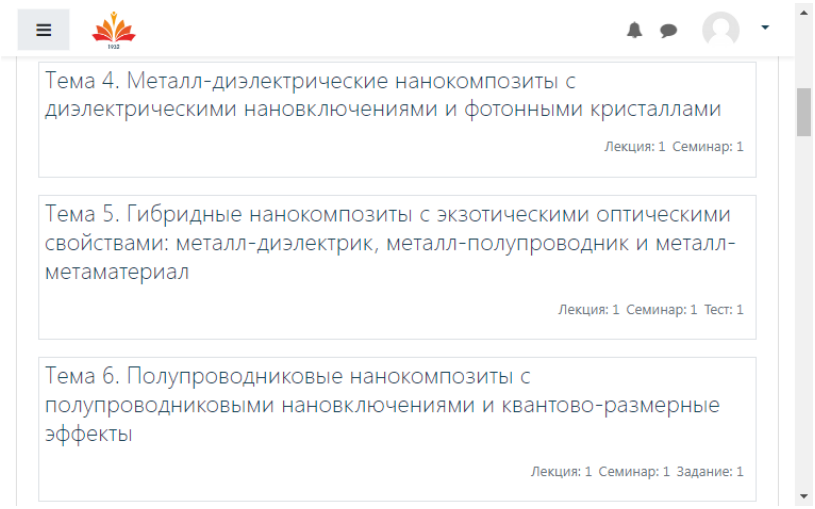


Рис. 2. Страница тематических модулей второй зачётной единицы дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE

единицы дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

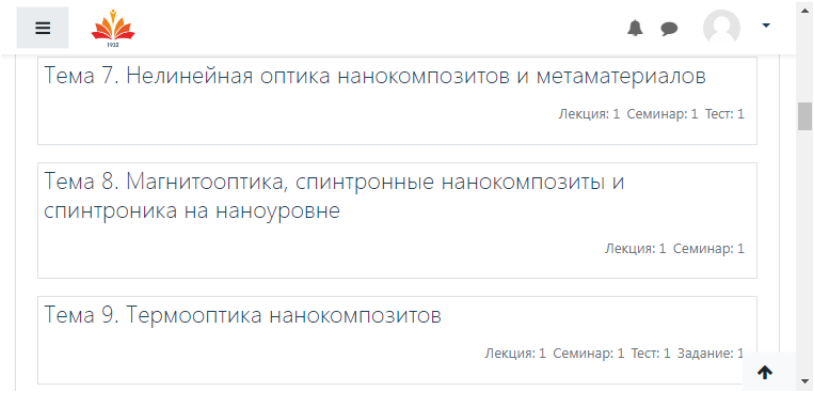


Рис. 3. Страница тематических модулей третьей зачётной единицы дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE

На рис. 3 приведено изображение страницы тематических модулей третьей зачётной единицы дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 4 приведено изображение страницы тематических модулей четвёртой зачётной единицы дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 5 приведено изображение страницы элементов первой темы дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 6 приведено изображение страницы элементов второй темы дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

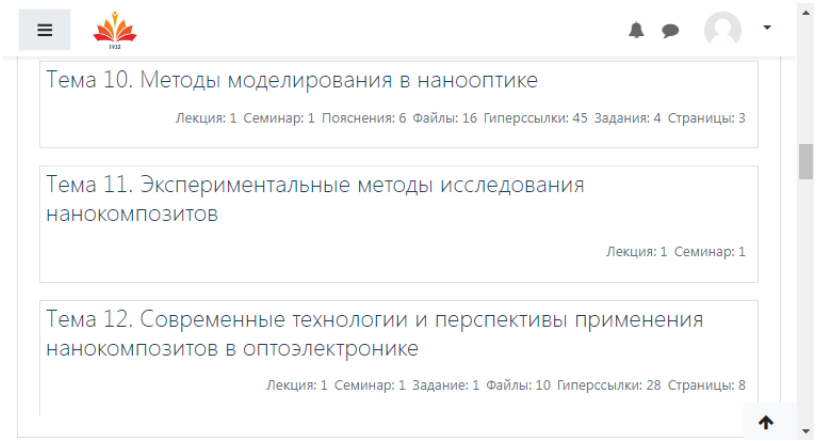


Рис. 4. Страница тематических модулей четвёртой зачётной единицы дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE



Рис. 5. Страница элементов первой темы дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE

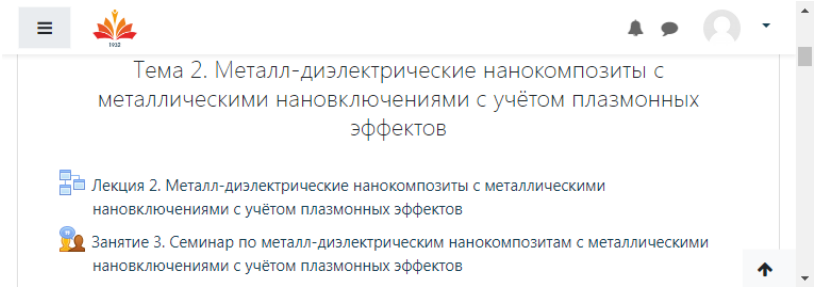


Рис. 6. Страница элементов второй темы дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE

На рис. 7 приведено изображение страницы элементов третьей темы дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

Первое практическое занятие дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями проводится в форме семинара по основам нанооптики и принципам взаимодействия света с нанообъектами. Второе занятие дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями проводится в форме теста по основам нанооптики и принципам взаимодействия света с нанообъектами. Третье занятие дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями проводится в форме семинара по металл-диэлектрическим нанокомпозитам с металлическими нанов-

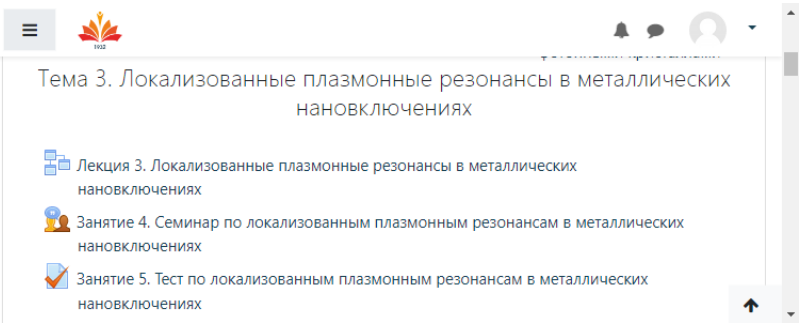


Рис. 7. Страница элементов третьей темы дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE

ключениями с учётом плазмонных эффектов. Четвёртое занятие дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями проводится в форме семинара по локализованным плазмонным резонансам в металлических нановключениях. Пятое занятие дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями проводится в форме теста по локализованным плазмонным резонансам в металлических нановключениях. Шестое занятие дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями проводится в форме семинара по металл-диэлектрическим нанокомпозитам с диэлектрическими нановключениями и фотонными кристаллами. Седьмое занятие дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями проводится в форме семинара по гибридным нанокомпозитам с экзотическими оптическими свойствами. Восьмое занятие дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями проводится в форме теста по гибридным нанокомпозитам с экзотическими оптическими свойствами. Девятое занятие дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями проводится в форме семинара по полупроводниковым нанокомпозитам с полупроводниковыми нановключениями и квантово-размерным эффектам. Десятое занятие дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями проводится в форме контрольной работы по нанокомпозитам. Одиннадцатое занятие дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями проводится в форме семинара по нелинейной оптике нанокомпозитов и метаматериалов. Двенадцатое занятие дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями проводится в форме теста по нелинейной оптике нанокомпозитов и метаматериалов. Тринадцатое занятие дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями проводится в форме семинара по магнитооптике, спинтронным нанокомпозитам и спинтронике на наноуровне. Четырнадцатое занятие дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями проводится в форме семинара по термооптике нанокомпозитов. Пятнадцатое занятие дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями проводится в форме теста по термооптике нанокомпозитов. Шестнадцатое занятие дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями проводится в форме обсуждения выполнения задания с рефератом по методам моделирования в нанооптике. Семнадцатое занятие дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями проводится в форме семинара по методам моделирования в нанооптике. Восемнадцатое занятие дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями проводится в форме семинара по самосборке и росту наноструктур. Девятнадцатое занятие дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями проводится в форме семинара по современным технологиям и перспективам применения нанокомпозитов в оптоэлектронике. Двадцатое занятие дистанционного курса по нанооптике наноком-

позитов с нановключениями проводится в форме контрольной работы по нанооптике нанокомпозитов.

Разработанная концепция курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями демонстрирует целенаправленное сочетание теоретической глубины и прикладной направленности, что позволяет сформировать у слушателей комплексное понимание физических принципов, методов моделирования и практических приложений систем нанооптики. Курс строится на системно-деятельностном подходе, где каждая тема не только расширяет базовые знания, но и интегрирует их в контекст современных научных и инженерных задач, что повышает мотивацию обучения и актуальность получаемых компетенций.

Структура курса, ориентированная на поступательное усложнение материала — от основ нанооптики до специализированных тем в области нелинейной оптики, спинтроники и термооптических эффектов, — обеспечивает логическую последовательность восприятия информации. Такой подход особенно важен для дистанционной формы обучения, где слушатели должны самостоятельно структурировать знания, опираясь на чётко определённые учебные вопросы и промежуточные контрольные точки. При этом тематический план курса учитывает междисциплинарность, объединяя знания из физики конденсированного состояния, оптоэлектроники, материаловедения и вычислительной техники, что соответствует современным трендам в подготовке исследователей и инженеров на стыке наук.

Использование мультимедийного контента в дистанционном курсе в сочетании с интерактивными элементами (симуляции, виртуальные лаборатории, примеры кода) позволяет компенсировать отсутствие очного взаимодействия и сделать сложные физические концепции более доступными. Например, визуализация локализованных плазмонных резонансов или моделирование спектральных свойств гибридных нанокомпозитов в реальном времени не только улучшает понимание теории, но и развивает навыки самостоятельной работы с современными инструментами исследований. Особое значение имеет интеграция практических заданий с использованием специализированного программного обеспечения (Python, Octave), что готовит слушателей к реальным задачам научных исследований и промышленного применения.

Система контроля знаний, разработанная для системы MOODLE, предусматривает многоуровневую оценку компетенций, включающую как традиционные формы проверки (тесты, экзамены), так и проектно-ориентированные задания, которые требуют применения полученных знаний в новых контекстах. Проектные работы, направленные на разработку нанокомпозитов с заданными оптическими свойствами, формируют у слушателей исследовательские навыки и способствуют развитию творческого подхода к решению задач. Кроме того, внедрение форумов и дискуссий на платформе стимулирует обмен мнениями и взаимное обучение, создавая сообщество единомышленников, что особенно важно для курсов с узкой специализацией.

Особенностью дистанционного курса является упор на актуальность и связь с передовыми научными разработками, что подчёркивается включением тем, посвящённых современным технологиям и перспективам применения нанокомпозитов в оптоэлектронике. Это позволяет слушателям не только усвоить классические подходы, но и получить представление о текущих тенденциях в науке, таких как спинтроника, метаматериалы и термооптические системы. Обновляемость контента, предполагающая ежегодное добавление новых разделов с учётом последних публикаций и технологических достижений, гарантирует, что курс останется востребованным и соответствует динамично развивающейся области нанооптики.

Реализация курса в системе управления обучением MOODLE обеспечивает гибкость в управлении обучением, позволяя адаптировать материалы под индивидуальные по-

требности слушателей и корректировать курс на основе их обратной связи. Возможности платформы, такие как автоматизированная проверка тестов, интеграция видеоматериалов и интерактивных модулей, а также инструменты для мониторинга активности, способствуют эффективному организации учебного процесса. Кроме того, система MOODLE предоставляет удобные возможности для обеспечения доступности курса для всех категорий слушателей, включая тех, кто имеет ограниченные возможности, за счёт адаптивных форматов контента и технической поддержки.

Важным аспектом педагогического проектирования является развитие самостоятельной познавательной деятельности, которое достигается через комбинацию самостоятельных и групповых форм работы, а также через предлагаемые ресурсы для самообразования (рекомендуемая литература, научные статьи, видеолекции). Это позволяет слушателям не только усвоить программный материал, но и научиться работать с первоисточниками, критически анализировать информацию и применять её в своих исследованиях. Такие подходы формируют ключевые навыки, необходимые для научной и инженерной карьеры.

Эффективность курса подтверждается модульным принципом построения, что облегчает восприятие сложного материала и позволяет слушателям выстраивать индивидуальный темп обучения. Каждая тема курса снабжена не только теоретическим материалом, но и сопутствующими ресурсами — например, методическими указаниями по выполнению лабораторных работ или моделирования, что снижает порог вхождения для новичков и повышает качество освоения дисциплины. Особое внимание уделяется междисциплинарным связям, которые прослеживаются через интеграцию знаний из различных областей, что способствует формированию целостного мировоззрения у слушателей дистанционного курса.

Мониторинг и оценка эффективности курса через регулярный сбор обратной связи позволяют оперативно вносить коррективы в учебные материалы и методику преподавания. Анализ результатов тестирования, успеваемости и отзывов слушателей помогает выявить слабые места в курсе и усилить акценты на наиболее сложных и актуальных темах. Это приближает курс к идеалу рефлексивного обучения, где сам процесс преподавания постоянно совершенствуется на основе практического опыта и потребностей аудитории.

Важным результатом выполнения проекта в рамках изучения курса является развитие у слушателей навыков исследовательской работы и подготовка их к участию в современных научных проектах. Отдельные темы курса, такие как методы моделирования и экспериментальные техники, готовят слушателей к практической деятельности в лабораториях или промышленных коллективах, где знания нанооптики находят непосредственное применение. Это повышает конкурентоспособность выпускников на рынке труда и увеличивает их шансы на успешную карьеру в научной и инженерной сферах.

Наконец, реализация дистанционного формата курса в системе управления обучением MOODLE демонстрирует возможность эффективного обучения высокотехнологичным дисциплинам на расстоянии, что особенно актуально в условиях глобализации науки и ограниченной географической доступности специализированных образовательных программ. Курс показывает, что даже сложные и многогранные темы, такие как нанооптика и нанокомпозиты, могут быть успешно транслированы в онлайн-формате при условии грамотного использования современных цифровых инструментов и интерактивных методов обучения. Такая модель имеет потенциал для масштабирования и адаптации к другим научным дисциплинам, требующим комплексного подхода в преподавании.

На основе анализа работ [1–15] показано, что курс нанооптики нанокомпозитов обладает рядом преимуществ перед другими формами обучения, такими как гибкость

графика изучения курса нанооптики нанокомпозитов, доступность и возможность обучения в удобное время.

Заключение

Разработан структурированный дистанционный курс по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями с использованием дистанционных технологий в системе управления обучением MOODLE. Разработка дистанционного курса нанооптики нанокомпозитов представляет собой итеративный процесс, требующий междисциплинарного подхода. Сочетание научной обоснованности и практической адаптации обеспечивает его актуальность и востребованность в высшем образовании.

Выводы по работе можно сформулировать следующим образом:

1. разработанный дистанционный курс нанооптики нанокомпозитов готов к использованию в учебном процессе педагогического университета и позволяет проводить проверку знаний студентов в условиях смешанного обучения нанооптике,
2. дистанционные методы обучения повышают вовлечённость студентов и качество усвоения материала дистанционного курса по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями.

Дистанционный курс нанооптики нанокомпозитов с нановключениями построен с использованием модульной технологии построения курса, что позволяет эффективно управлять темпом продвижения по курсу нанооптики нанокомпозитов с нановключениями и применять смешанную технологию в преподавании нанооптики.

Разработанный дистанционный курс нанооптики нанокомпозитов с нановключениями готов к использованию в образовательном процессе педагогического университета с использованием дистанционных технологий в системе управления обучением MOODLE.

Гипотеза исследования, заключающаяся в том, что если использовать дистанционный курс по нанооптике нанокомпозитов с нановключениями, то повысится доступность и качество обучения нанооптике за счёт применения дистанционных технологий и практико-ориентированных методов обучения нанооптике, подтверждена полностью.

Задачи работы решены полностью.

Теоретические аспекты внесли вклад в методику дистанционного обучения нанооптике.

Курс нанооптики нанокомпозитов может быть внедрён в образовательные программы вузов по техническим и инженерным направлениям подготовки.

Список использованных источников

1. Алтунин 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.

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 нанофизике 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 нанокомпозитных материалов в курсе по оптике тонкослойных и наноструктурных покрытий // Наука online. — 2022. — № 2 (19). — С. 18–30. — URL: https://elibrary.ru/wgfhkb.

5. Алтунин 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.

6. Алтунин К. К., Петрова Е. А. Разработка модульной структуры дистнционного курса «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. Тимченко В. М. Проектирование дистанционного курса по физике мезоскопических систем // Наука online. — 2023. — № 4 (25). — С. 80–90. — URL: http://nauka-online.ru/wp-content/uploads/2024/01/04252023-005.pdf.

9. Илюшкина Е. А. Разработка дистанционного курса по радиотехническим устройствам в школе // Наука online. — 2024. — № 4 (29). — С. 60–72. — URL: http://nauka-online.ru/wp-content/uploads/2024/12/04292024-006.pdf.

10. Павлова Е. С. Разработка дистанционного курса по квантовым точкам // Наука online. — 2025. — № 4 (33). — С. 1–21. — URL: http://nauka-online.ru/wp-content/uploads/2025/12/04332025-001.pdf.

11. Родионова А. А. Проектирование дистанционного курса по современным дидактическим системам для высшего образования // Наука online. — 2026. — № 1 (34). — С. 1–21. — URL: http://nauka-online.ru/wp-content/uploads/2026/04/01342026-001.pdf.

12. Родионова А. А. Проектирование учебной дисциплины по физической картине мира в педагогическом университете // Наука online. — 2025. — № 4 (33). — С. 22–38. — URL: http://nauka-online.ru/wp-content/uploads/2025/12/04332025-002.pdf.

13. Родионова А. А. Разработка дистанционного курса по моделированию наноматериалов // Наука online. — 2025. — № 2 (31). — С. 26–48. — URL: http://nauka-online.ru/wp-content/uploads/2025/07/02312025-002.pdf.

14. Родионова А. А. Проектирование информационной системы поддержки преподавания учебной дисциплины по теории деятельностного подхода в обучении физике // Наука online. — 2025. — № 1 (30). — С. 12–27. — URL: http://nauka-online.ru/wp-content/uploads/2025/03/01302025-002.pdf.

15. Родионова А. А. Разработка дистанционного курса по микроэлектронике в развивающих игровых устройствах для детей // Наука online. — 2024. — № 4 (29). — С. 82–93. — URL: http://nauka-online.ru/wp-content/uploads/2024/12/04292024-008.pdf.

Сведения об авторах:

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

E-mail: rod_nastay_0000@mail.ru

ORCID iD 0009-0001-1749-7450

Web of Science ResearcherID ISA-2132-2023

Original article
PACS 01.40.Di
OCIS 000.2060
MSC 78A48

Pedagogical design of a distance learning course on nanooptics of nanocomposites with nanoinclusions in the learning management system MOODLE

A. A. Rodionova

Ulyanovsk State Pedagogical University, 432071, Ulyanovsk, Russia

Submitted May 11, 2026
Resubmitted May 12, 2026
Published June 30, 2026

Abstract. The aim of this study is to investigate the development of a distance learning course on nanooptics of nanocomposites with nanoinclusions, aimed at developing students' competencies in photonics and nanooptics using modern digital technologies. The study utilizes distance learning course development methods. The results of the study include the development of a course structure for nanooptics of nanocomposites with nanoinclusions and the selection of theoretical course materials. The practical significance of this study lies in the potential application of the developed nanooptics of nanocomposites course in educational institutions.

Keywords: course, distance learning course, nanooptics, nanocomposite, nanoscale inclusion, module, learning management system

References

1. Altunin K. K., Kolesova T. A. Development of distance learning course elements on physical nanoelectronics in the learning management system MOODLE // 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 learning management system MOODLE // 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 spasers 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 // Science online. — 2019. — no. 2 (7). — P. 15–32. — URL: https://elibrary.ru/omnoyk.

8. Timchenko V. M. Designing a distance learning course on the physics of mesoscopic systems // Science online. — 2023. — no. 4 (25). — P. 80–90. — URL: http://nauka-online.ru/wp-content/uploads/2024/01/04252023-005.pdf.

9. Ilyushkina E. A. Development of a distance learning course on radio-engineering devices at school // Science online. — 2024. — no. 4 (29). — P. 60–72. — URL: http://nauka-online.ru/wp-content/uploads/2024/12/04292024-006.pdf.

10. Pavlova E. S. Development of a distance learning course on quantum dots // Science online. — 2025. — no. 4 (33). — P. 1–21. — URL: http://nauka-online.ru/wp-content/uploads/2025/12/04332025-001.pdf.

11. Altunin K. K., Rodionova A. A. Investigation of optical characteristics of nanophotonic systems based on the nanomaterial with quasi-unity effective refractive index // Materials of the 27th All-Russian youth scientific conference. — APPFE-2024. — Ulyanovsk State Technical University, 2024. — Oct. — P. 158–160. — URL: http://dx.doi.org/10.61527/APPFE-2024.158-160.

12. Rodionova A. A. Designing a distance learning course on modern didactic systems for higher education // Science online. — 2026. — no. 1 (34). — P. 1–21. — URL: http://nauka-online.ru/wp-content/uploads/2026/04/01342026-001.pdf.

13. Rodionova A. A. Designing an academic course on the physical picture of the world at a pedagogical university // Science online. — 2025. — no. 4 (33). — P. 22–38. — URL: http://nauka-online.ru/wp-content/uploads/2025/12/04332025-002.pdf.

14. Rodionova A. A. Development of a distance learning course on nanomaterial modeling // Science online. — 2025. — no. 2 (31). — P. 26–48. — URL: http://nauka-online.ru/wp-content/uploads/2025/07/02312025-002.pdf.

15. Rodionova A. A. Designing an information system to support the teaching of the discipline on the activity-based theory of physics education // Science online. — 2025. — no. 1 (30). — P. 12–27. — URL: http://nauka-online.ru/wp-content/uploads/2025/03/01302025-002.pdf.

16. Rodionova A. A. Development of a distance learning course on microelectronics in educational gaming devices for children // Science online. — 2024. — no. 4 (29). — P. 82–93. — URL: http://nauka-online.ru/wp-content/uploads/2024/12/04292024-008.pdf.

Information about authors:

Anastasia Alexandrovna Rodionova — student of the Faculty of Physics, Mathematics and Technological Education of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Ulyanovsk State Pedagogical University”, Ulyanovsk, Russia.

E-mail: rod_nastay_0000@mail.ru

ORCID iD 0009-0001-1749-7450

Web of Science ResearcherID ISA-2132-2023

Научная статья
УДК 372.853
ББК 74.489
ГРНТИ 14.35.09
ВАК 5.8.2.
PACS 01.40.Di
OCIS 000.2060
MSC 78A10

Педагогическое проектирование дистанционного курса нанооптики нанопористых структур в системе управления обучением MOODLE

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 18 мая 2026 года
После переработки 20 мая 2026 года
Опубликована 30 июня 2026 года

Аннотация. Представлены результаты разработки дистанционного курса нанооптики нанопористых структур в системе управления обучением MOODLE. Целью исследования является описание процесса разработки дистанционного курса нанооптики нанопористых структур в системе управления обучением MOODLE. Описаны результаты разработки структуры и элементов дистанционного курса нанооптики нанопористых структур в системе управления обучением MOODLE.

Ключевые слова: курс, дистанционный курс, нанооптика, нанопористая структура, модульная технология, система управления обучением

Введение

Целью исследования является разработка дистанционного курса нанооптики нанопористых структур.

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 нанооптики нанопористых структур, соответствующих актуальным тенденциям в развитии нанотехнологий,
3. разработка методического обеспечения курса нанооптики нанопористых структур, включая теоретические материалы, материалы для контроля знаний и систему оценивания.

[1] E-mail: selyukova2003810@gmail.com

Объектом исследования является дистанционное обучение в сфере нанотехнологий. Предметом исследования является процесс разработки дистанционного курса нанооптики нанопористых структур.

Методами исследования являются анализ научной литературы по теме исследования, моделирование структуры курса нанооптики нанопористых структур с учётом принципов педагогического дизайна. Материалами исследования являются научные публикации по нанопористым структурам, платформа MOODLE.

Научная новизна исследования заключается в том, что разработана авторская методика преподавания курса нанооптики нанопористых структур в дистанционном формате.

Гипотеза исследования заключается в том, что если использовать специализированный дистанционный курс нанооптики нанопористых структур, интегрирующий теоретические материалы и практические задания, то можно повысить эффективность изучения нанооптики.

Теоретическая значимость заключается в том, что исследование дополняет педагогическую науку новыми подходами к разработке дистанционных курсов в области высокотехнологичных дисциплин по фотонике, нанотике и нанотехнологиям.

Практическая значимость заключается в том, что разработанный курс нанооптики нанопористых структур может быть внедрён в программы высшего образования, что позволит расширить доступ к обучению и повысить квалификацию специалистов.

Базой исследования для создания дистанционного курса нанооптики нанопористых структур в системе управления обучением MOODLE является образовательный портал ФГБОУ ВО «УлГПУ им. И. Н. Ульянова».

Описание этапов разработки курса нанооптики нанопористых структур в системе управления обучением MOODLE

Первая тема посвящена изучению физико-химических основ нанопористых и пористых наноструктур. Вторая тема посвящена изучению электрохимического травления и анодного окисления полупроводников. Третья тема посвящена изучению химического травления и золь-гель методов для оксидных нанопористых структур. Четвёртая тема посвящена изучению шаблонных методов. Пятая тема посвящена изучению плазменных и лазерных методов. Шестая тема посвящена изучению нанопористых металл-диэлектрических композитных и гибридных структур. Седьмая тема посвящена изучению оптических свойств нанопористых структур. Восьмая тема посвящена изучению нанопористых структур в оптоэлектронных приборах и сенсорике. Девятая тема посвящена изучению современных тенденций и будущего нанопористых структур и материалов.

Разработка дистанционного курса по нанооптике нанопористых структур в системе управления обучением MOODLE требует системного подхода, направленного на формирование у слушателей глубокого понимания физических, технологических и прикладных аспектов наноструктурированных материалов. Процесс создания курса начинается с определением целевой аудитории, в которую входят студенты старших курсов, аспиранты, научные сотрудники и специалисты в области оптоэлектроники, фотоники и материаловедения. Обращая внимание на междисциплинарный характер темы, необходимо сбалансировать теоретическую основу и практические применения нанопористых структур, чтобы курс был востребован как для исследователей, так и для инженеров.

Следующим важным шагом является разработка структуры курса, где логическая последовательность тем позволяет слушателям постепенно углублять свои знания, начиная с фундаментальных физико-химических основ и заканчивая современными тенденциями развития технологий. Первая тема посвящена изучению физико-химических

принципов формирования нанопористых структур, где слушатели познакомятся с ключевыми концепциями перехода от атомарного уровня к макроскопическим фотонным кристаллам, что станет основой для понимания оптоэлектронных и фотонических приложений. Такой подход обеспечивает плавный вход в тематику, позволяя слушателям закрепить основные понятия перед переходом к более специализированным методам синтеза и модификации материалов.

После освоения теоретических основ переходят к изучению методов создания нанопористых структур, начиная с электрохимических процессов, таких как анодное окисление полупроводников. Этот раздел включает практические аспекты травления кремния и германия, что особенно важно для слушателей, интересующихся полупроводниковыми технологиями. Далее рассматриваются химические методы, такие как золь-гель технологии для оксидных нанопористых материалов, где акцент делается на контроле морфологии и функциональных свойств полученных структур. Такое последовательное изложение позволяет слушателям ознакомиться с разнообразием подходов к синтезу и выбрать оптимальные для своих задач.

Следующая группа тем посвящена более специфичным и инновационным методам, включая шаблонные технологии, плазменные и лазерные методы формирования нанопор. Здесь особое внимание уделяется индивидуализации структур, например, использованию микросфер и вирусов в качестве шаблонов, что расширяет возможности создания материалов с заданными свойствами. Раздел также включает обсуждение быстрых технологий, таких как плазменная и лазерная обработка, которые находят широкое применение в оптоэлектронике. Такой подход позволяет слушателям оценить как традиционные, так и перспективные методы, что стимулирует дальнейшее развитие их исследовательских идей.

После изучения технологических аспектов дистанционный курс переходит к оптическим свойствам нанопористых структур, где студенты знакомятся с фотонными кристаллами, метаматериалами и физическими принципами работы сенсоров на их основе. Здесь особое внимание уделяется управлению светом с помощью нанопор, включая концепции невидимости и повышения эффективности оптоэлектронных устройств. Такой раздел не только углубляет теоретические знания, но и демонстрирует практическое применение нанопористых структур в реальных системах, что мотивирует слушателей к дальнейшему изучению темы.

Далее рассматриваются приложения нанопористых структур в оптоэлектронике и сенсорике, где слушатели знакомятся с современными устройствами, такими как сенсоры окружающей среды, сенсоры и элементы фотоники. Здесь важно показать, как нанопоры интегрируются в сложные системы, что требует междисциплинарных знаний в области физики, химии и наноинженерии. Этот раздел курса также включает анализ преимуществ и ограничений нанопористых материалов в сравнении с традиционными решениями, что помогает слушателям критически оценивать перспективы их использования.

Завершается курс обсуждением современных тенденций и будущего нанопористых структур, где слушатели знакомятся с последними достижениями в области нанотехнологий, такими как гибридные материалы, интеграция с искусственным интеллектом и новые методы контроля морфологии. Этот раздел не только обобщает пройденный материал, но и стимулирует слушателей к самостоятельному поиску новых идей и разработке собственных проектов. Акцент на будущих направлениях развития позволяет слушателям осознать актуальность изучаемой темы и перспективы применения полученных знаний.

Одним из ключевых этапов в разработке курса является проектирование контента для системы управления обучением MOODLE, где каждый раздел сопровождается

мультимедийными материалами, такими как презентации, лекции преподавателей, интерактивные симуляции и онлайн-лабораторные работы. Для усиления практической направленности курса предусматриваются задания с развернутыми ответами, тесты для самоконтроля и групповые проекты, где слушатели могут применить полученные знания на практике. Такая организация материала способствует активному вовлечению слушателей и повышает эффективность обучения.

Важным аспектом разработки дистанционного курса по нанооптике нанопористых структур является также обеспечение обратной связи между преподавателями и студентами, где в системе управления обучением MOODLE создаются форумы для обсуждения, чаты и индивидуальные консультации. Это позволяет слушателям задавать вопросы, делиться своими идеями и получать оперативную поддержку, что особенно важно для сложных и быстроразвивающихся областей, таких как нанооптика. Кроме того, для мотивации слушателей предусматриваются сертификаты или зачётные баллы, которые подтверждают прохождение курса и полученные знания.

На заключительном этапе проводится тестирование курса с привлечением пилотной группы слушателей, что позволяет выявить недочёты и внести необходимые коррективы. После апробации курс окончательно оформляется в системе управления обучением MOODLE с учётом отзывов и предложений, что обеспечивает его готовность к массовому использованию. Таким образом, разработка курса завершается созданием высококачественного, интерактивного и практического образовательного продукта, который соответствует современным требованиям дистанционного обучения и способствует профессиональному росту слушателей.

Процесс создания дистанционного курса требует тщательно продуманного педагогического проектирования, которое начинается с определения образовательных целей и компетенций, формируемых у слушателей. Курс рассчитан на 108 академических часов (3 зачётные единицы), что соответствует углублённому изучению темы и предполагает сочетание теоретической подготовки с практической деятельностью, включая лабораторные работы, проекты и анализ современных исследований. Основной целью является формирование у студентов комплексного видения нанооптических систем на основе нанопористых материалов, их физических свойств, технологий изготовления и прикладных возможностей в оптоэлектронике и фотонике.

На первом этапе разработки концепции дистанционного курса происходит анализ потребностей целевой аудитории, определяются компетенции и требования к уровню подготовки слушателей. Курс ориентирован на междисциплинарный подход, объединяя знания из области физики конденсированного состояния, материаловедения, электрохимии и оптоэлектроники. Это обусловливает необходимость структурированного изложения теоретического материала, начиная с фундаментальных физических основ и заканчивая актуальными научными исследованиями, что позволяет слушателям с разным уровнем подготовки эффективно усваивать сложные понятия, такие как формирование фотонных кристаллов, управление оптическими свойствами нанопор и интеграция наноматериалов в прикладные устройства.

После определения концепции следует разработка структуры курса, где каждая из девяти тем соответствует логическому продвижению от базовых физических принципов к современным технологическим и научным тенденциям. Например, первая тема посвящена переходу от атомарного уровня к макроскопическим фотонным кристаллам, что создаёт основу для понимания последующих разделов, таких как электрохимическое и химическое травление полупроводников и оксидов. Такая последовательность позволяет слушателям не только погружаться в теорию, но и осознавать практическую значимость изучаемых процессов, например, при создании сенсоров или элементов фотоники. Особое внимание уделяется интеграции каждой темы с последующими, чтобы

слушатели могли видеть связь между методами синтеза нанопористых структур и их оптическими свойствами, а также возможностями применения в реальных устройствах.

Далее осуществляется разработка образовательного контента, адаптированного для дистанционной формы обучения. В системе управления обучением MOODLE предполагается использование мультимедийных материалов, таких как лекции с иллюстрациями физических процессов, интерактивные симуляции, например, моделирование распространения света в фотонных кристаллах, а также доступ к научным статьям и патентным базам. Особое значение имеет создание развёрнутых лекционных блоков, включающих не только теоретический материал, но и примеры из реальных исследований, что помогает слушателям лучше усвоить сложные концепции. Для каждой темы разрабатываются дополнительные материалы, такие как подборка ключевых публикаций, презентации с выделенными формулами и принципиальными схемами, а также глоссарий терминов для быстрого восприятия.

Одним из ключевых этапов является проектирование практических занятий и лабораторных работ, которые позволяют слушателям применить теоретические знания на практике. В дистанционном формате лабораторные работы могут быть представлены в виде виртуальных симуляций, например, моделирование процесса анодного окисления кремния или расчёты оптических свойств нанопористых структур с использованием специализированного программного обеспечения. Альтернативно, для слушателей, имеющих доступ к лабораториям, предусматриваются онлайн-руководства с подробными инструкциями по проведению экспериментов, а также возможность загружать результаты для обсуждения на форуме или в чатах. Это способствует не только закреплению знаний, но и развитию исследовательских навыков, важных для будущей научной или инженерной деятельности.

Следующим важным шагом становится разработка системы оценки и контроля знаний, которая должна мотивировать слушателей к активному участию в обучении. В курсе предполагается использовать комбинированные методы оценки, включая тесты с автоматизированной проверкой в системе управления обучением MOODLE, задания с развёрнутыми ответами, анализ выполненных лабораторных работ и проектов. Например, после изучения тем, посвящённых электрохимическому травлению, слушателям предлагается разработать схему эксперимента по созданию нанопористого кремния и обосновать выбор параметров. Такие задания требуют глубокого понимания материала и стимулируют критическое мышление. Кроме того, вводится система накопления баллов за активность на форумах, участие в обсуждениях и взаимопроверку работ, что способствует формированию сообщества слушателей и обмену опытом.

Важным аспектом является организация взаимодействия между преподавателями и слушателями, которое обеспечивается через различные инструменты системы управления обучением MOODLE. Предусматриваются регулярные вебинары и консультации в режиме онлайн, где слушатели могут задавать вопросы и обсуждать сложные моменты. Форум для обсуждения тем позволяет слушателям делиться своими идеями, анализировать литературу и получать обратную связь от преподавателей. Также организуются групповые проекты, например, создание презентаций по актуальным исследованиям в области нанопористых структур с последующей защитой и обсуждением. Такие формы взаимодействия не только усиливают мотивацию, но и способствуют формированию навыков командной работы, что особенно важно для междисциплинарных областей науки.

На следующем этапе осуществляется адаптация материала для различных категорий слушателей, учитывая разный уровень подготовки и профессиональные интересы. Для студентов бакалавриата и магистратуры акцент делается на объяснении основных концепций и базовых методов, тогда как для аспирантов и специалистов предусматрива-

ются дополнительные материалы, такие как обзор передовых технологий и обсуждение нерешённых проблем в области нанооптики. Это позволяет курсу оставаться востребованным для широкой аудитории и обеспечивает гибкость в обучении. Кроме того, для каждого раздела разрабатываются рекомендации по выбору литературы в зависимости от уровня подготовки, что помогает слушателям справиться с учебными нагрузками.

Одним из ключевых элементов является интеграция актуальных научных исследований и тенденций в область физики нанопористых структур, что мотивирует слушателей и демонстрирует практическую значимость курса. В рамках каждой темы приводятся примеры последних публикаций, патентов и проектов, связанных с использованием нанопористых материалов в оптоэлектронике и сенсорике. Например, при изучении тем, посвящённых фотонным кристаллам, слушатели знакомятся с последними разработками в области метаматериалов и устройств для управления светом. Такое интегрирование научных трендов не только поддерживает интерес к курсу, но и стимулирует слушателей к дальнейшему самообразованию и возможной научно-исследовательской деятельности.

После разработки всех материалов осуществляется пилотное тестирование дистанционного курса с привлечением небольшой группы слушателей для выявления возможных ошибок и недочётов. На этом этапе оценивается понятность материала, эффективность практических заданий и удобство использования платформы MOODLE. Обратная связь от участников пилотной группы позволяет скорректировать структуру курса, уточнить формулировки, улучшить интерактивные элементы и внести другие необходимые изменения. Такое тестирование является критически важным, так как позволяет убедиться в готовности курса к массовому использованию и обеспечить высокий уровень его качества.

Завершающим этапом становится финальная доработка и запуск дистанционного курса в системе управления обучением MOODLE, где все материалы оформляются в удобном для восприятия виде, разрабатывается система навигации и доступности контента. Курс оснащается инструкциями для слушателей, включающими рекомендации по организации времени, использованию инструментов платформы и критерии оценки. Также предусматривается система технической поддержки для решения возможных проблем при доступе к материалам или выполнении заданий. Запуск дистанционного курса сопровождается информационной кампанией, направленной на привлечение слушателей и ознакомление их с программой обучения, что способствует успешному старту и высокому уровню вовлечённости.

Таким образом, педагогическое проектирование курса по нанооптике нанопористых структур в системе управления обучением MOODLE представляет собой процесс, требующий тщательной проработки каждой составляющей, от определения образовательных целей до запуска дистанционного курса по нанооптике нанопористых структура. Каждый этап разработки курса логически связан с предыдущими и последующими, что обеспечивает целостность курса и его соответствие современным требованиям дистанционного образования. В результате слушатели получают не только теоретические знания, но и практические навыки, необходимые для успешной работы в области нанооптики и смежных направлениях.

Результаты разработки структуры и избранных элементов курса нанооптики нанопористых структур в системе управления обучением MOODLE

Первая лекция посвящена изучению физико-химических основ нанопористых и пористых наноструктур. Вторая лекция посвящена изучению электрохимического трав-

ления и анодного окисления полупроводников. Третья лекция посвящена изучению химического травления и золь-гель методов для оксидных нанопористых структур. Четвёртая лекция посвящена изучению шаблонных методов. Пятая лекция посвящена изучению плазменных и лазерных методов. Шестая лекция посвящена изучению нанопористых металл-диэлектрических композитных и гибридных структур. Седьмая лекция посвящена изучению оптических свойств нанопористых структур. Восьмая лекция посвящена изучению нанопористых структур в оптоэлектронных приборах и сенсорике. Девятая лекция посвящена изучению современных тенденций и будущего нанопористых структур и материалов.

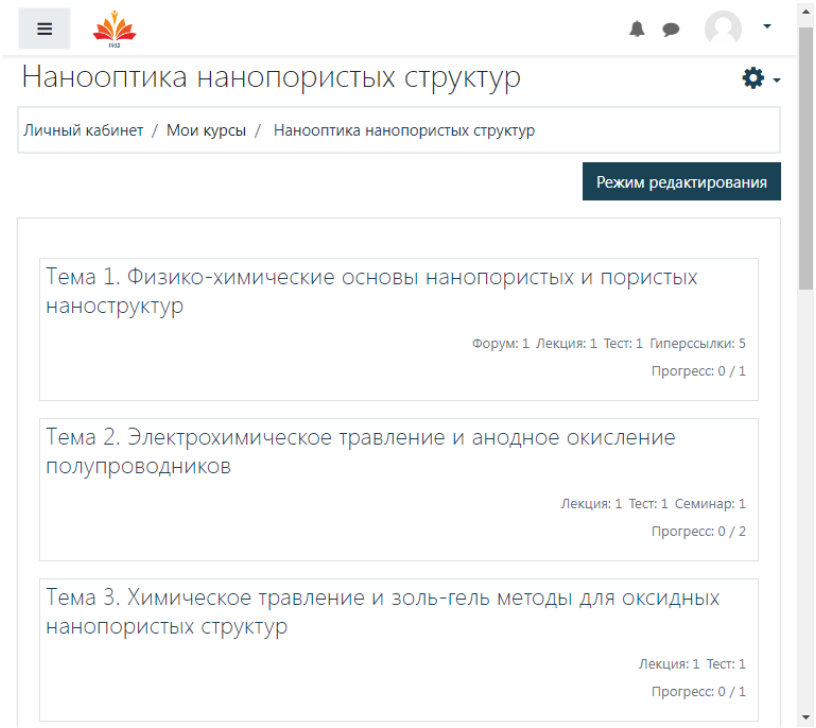


Рис. 1. Страница тематических модулей первой зачётной единицы дистанционного курса по нанооптике нанопористых структур, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE

На рис. 1 приведено изображение страницы тематических модулей первой зачётной единицы дистанционного курса нанооптики нанопористых структур, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 2 приведено изображение страницы тематических модулей второй зачётной единицы дистанционного курса нанооптики нанопористых структур, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 3 приведено изображение страницы тематических модулей третьей зачётной единицы курса нанооптики нанопористых структур, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 4 приведено изображение страницы элементов первой темы дистанционного курса нанооптики нанопористых структур, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 5 приведено изображение страницы элементов второй темы дистанционного курса нанооптики нанопористых структур, созданного на образовательном портале университета в системе MOODLE.

На рис. 6 приведено изображение страницы элементов третьей темы дистанционного курса нанооптики нанопористых структур, созданного на образовательном портале

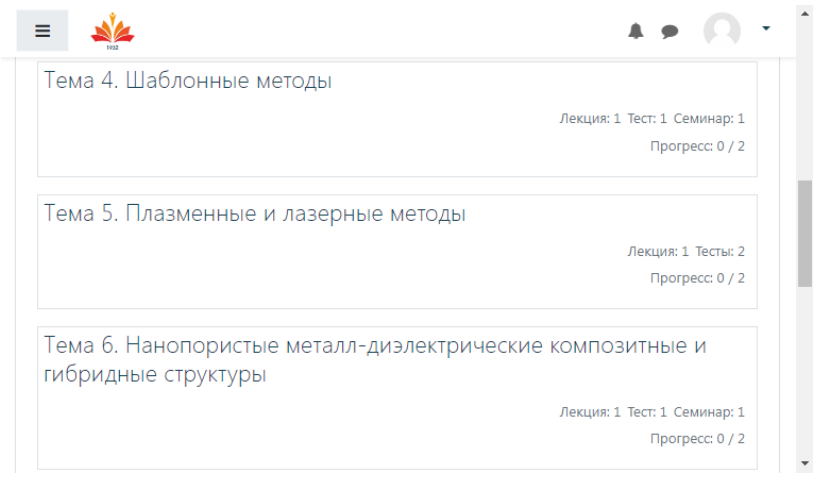


Рис. 2. Страница тематических модулей второй зачётной единицы дистанционного курса по нанооптике нанопористых структур, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE

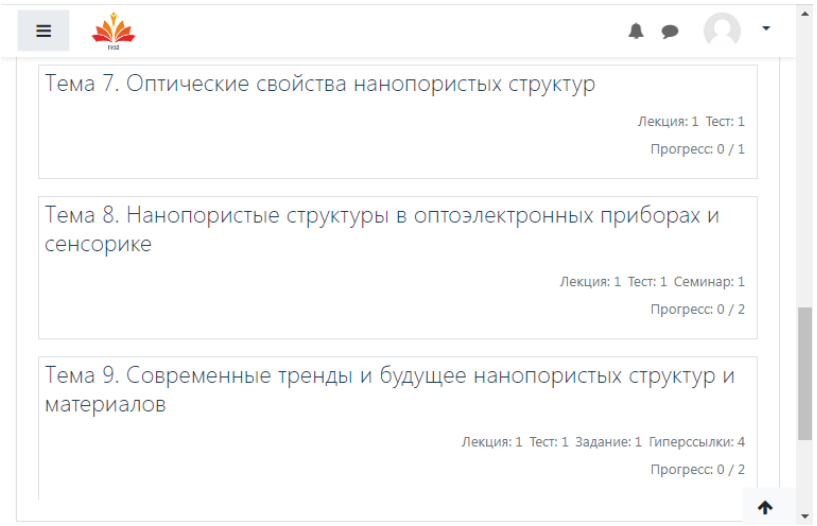


Рис. 3. Страница тематических модулей третьей зачётной единицы дистанционного курса по нанооптике нанопористых структур, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE

университета в системе MOODLE.

Первое занятие проводится в форме теста по физико-химическим основам нанопористых и пористых наноструктур. Второе занятие проводится в форме теса по электрохимическому травлению и анодному окислению полупроводников. Третье занятие проводится в форме семинара по электрохимическому травлению и анодному окислению полупроводников. Четвёртое занятие проводится в форме теста по химическому травлению и золь-гель методам для оксидных нанопористых структур. Пятое занятие проводится в форме теста по шаблонным методам. Шестое занятие проводится в форме семинара по шаблонным методам. Седьмое занятие проводится в форме теста по плазменным и лазерным методам. Восьмое занятие проводится в форме первой контрольной работы. Девятое занятие проводится в форме теста по нанопористым металл-диэлектрическим композитным и гибридным структурам. Десятое занятие проводится в форме семинара по нанопористым металл-диэлектрическим композитным и гибридным структурам. Одиннадцатое занятие проводится в форме теста по оптическим свойствам нанопористых структур. Двенадцатое занятие проводится в форме теста по нано-

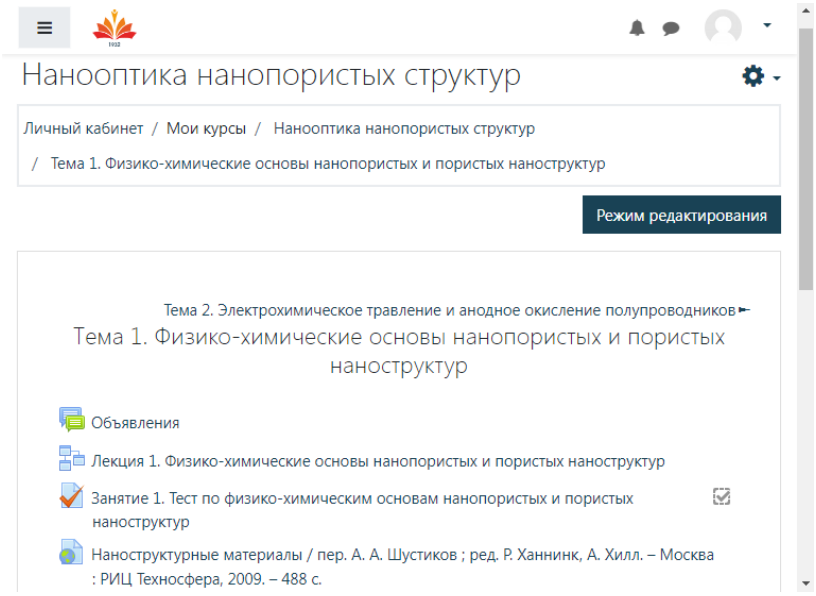


Рис. 4. Страница элементов первой темы дистанционного курса по нанооптике нанопористых структур, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE

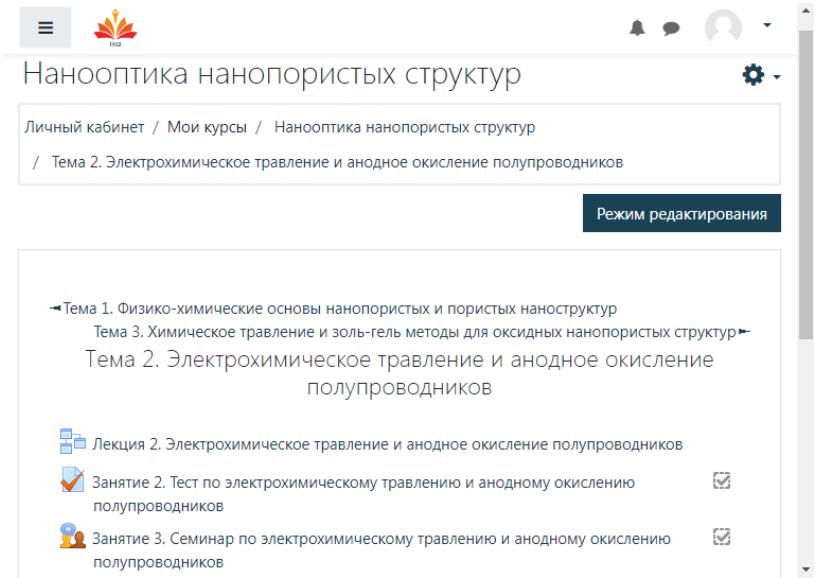


Рис. 5. Страница элементов второй темы дистанционного курса по нанооптике нанопористых структур, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE

пористым структурам в оптоэлектронных приборах и сенсорике. Тринадцатое занятие проводится в форме семинара по нанопористым структурам в оптоэлектронных приборах и сенсорике. Четырнадцатое занятие проводится в форме теста по современным тенденциям и будущему нанопористых структур и материалов. Пятнадцатое занятие проводится в форме итоговой работы по нанооптике нанопористых структур.

Разработка и педагогическое проектирование курса по нанооптике нанопористых структур в системе управления обучением MOODLE продемонстрировали высокую эффективность интеграции современных научных знаний с инновационными подходами в дистанционном образовании. Одним из ключевых выводов является подтверждение междисциплинарного характера курса, который объединил физику конденсированно-

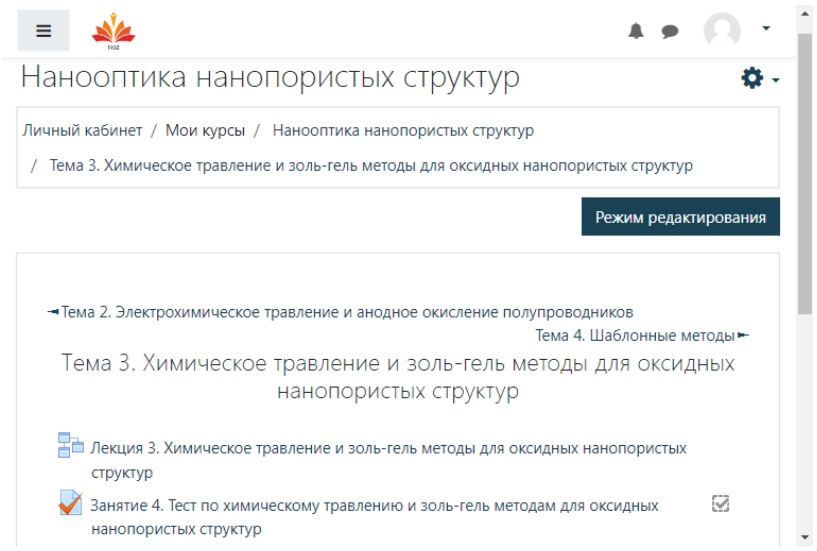


Рис. 6. Страница элементов третьей темы дистанционного курса по нанооптике нанопористых структур, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE

го состояния, химию материалов, электрохимию и оптоэлектронику в единую образовательную траекторию. Такое структурирование материала позволило слушателям не только усвоить фундаментальные принципы формирования нанопористых структур, но и понять их прикладное значение в перспективных технологиях, что особенно важно для подготовки специалистов в высокотехнологичных областях.

Особое внимание в процессе разработки уделялось последовательности изложения материала, начиная с атомарного уровня и переходом к макроскопическим фотонным кристаллам и металл-диэлектрическим композитам. Такой подход не только обеспечил логическую целостность курса, но и позволил слушателям с разным уровнем подготовки, включая студентов бакалавриата, магистрантов и аспирантов, эффективно усваивать сложные концепции, такие как управление оптическими свойствами нанопор или интеграция наноматериалов в сенсорные системы. Это подтвердило необходимость адаптации образовательного контента под аудиторию с различной базовой подготовкой, что стало одним из стратегических решений в проектировании курса.

Использование мультимедийных материалов и интерактивных элементов в системе управления обучением MOODLE, включая лекции, симуляции и доступ к актуальным научным статьям, существенно повысило качество усвоения материала. Визуализация физических процессов, таких как электрохимическое травление кремния или формирование фотонных кристаллов, позволила слушателям лучше понять абстрактные концепции, которые традиционно сложны для восприятия. Такой подход также способствовал формированию навыков самостоятельной работы с научной информацией, что является ключевым компетенцией для будущих исследователей и инженеров.

Организация практических занятий в дистанционном формате, включая виртуальные лабораторные работы и проекты, стала одним из наиболее успешных решений в проектировании курса. Слушатели не только закрепили теоретические знания на практике, но и получили опыт работы с современными инструментами моделирования, что расширило их технический арсенал. Особенно важным оказалось использование онлайн-руководств для выполнения лабораторных работ, которые позволили слушателям из разных регионов применить полученные знания в условиях дистанционного обучения.

Система оценки, включающая автоматизированные тесты, развёрнутые задания и

групповые проекты, доказала свою эффективность в мотивации слушателей. Комбинированный подход к контролю знаний не только объективно оценивал уровень подготовки, но и стимулировал активное участие в обсуждениях и обмене опытом на форумах. Введение системы накопления баллов за активность на платформе способствовало формированию сообщества слушателей, что особенно важно для междисциплинарных областей, где обмен идеями и критика являются неотъемлемой частью учебного процесса.

Интеграция актуальных научных тенденций, таких как применение нанопористых структур в метаматериалах или устройствах для управления светом, значительно повысила интерес слушателей к курсу. Демонстрация практической значимости изучаемых концепций, например, через анализ последних публикаций и патентов, показала слушателям реальные перспективы применения нанооптики в современных технологиях. Это не только поддерживало мотивацию, но и стимулировало слушателей к дальнейшему самообразованию и потенциальной научно-исследовательской деятельности.

Дизайн дистанционного курса с учётом современных требований к дистанционному образованию, включая удобную навигацию в системе управления обучением MOODLE и техническую поддержку, обеспечил высокую доступность материала для слушателей. Пилотное тестирование курса выявило необходимость доработки отдельных элементов, что позволило скорректировать структуру и улучшить интерактивность, что подтвердило важность тестирования перед массовым запуском образовательного продукта.

Включение в курс темы современных тенденций развития и будущего нанопористых материалов подчеркнуло актуальность и перспективность изучаемой области. Обсуждение нерешённых научных проблем и новых направлений в нанооптике не только расширило горизонты слушателей, но и показало им возможность влияния на развитие этой области через собственные исследования. Это стало важным стимулом для вовлечения слушателей в научную деятельность.

Адаптация курса под разные категории слушателей, включая студентов, аспирантов и специалистов, доказала гибкость и универсальность предлагаемой программы. Разные уровни сложности и акцент на прикладных аспектах позволили курсу оставаться востребованным как для начинающих, так и для опытных специалистов. Это подтвердило необходимость модульного подхода в проектировании образовательных программ для дистанционного обучения.

Организация взаимодействия через вебинары, форумы и групповые проекты способствовала не только глубокому пониманию материала, но и формированию навыков командной работы, что является важным для будущей профессиональной деятельности в междисциплинарных командах. Обратная связь от слушателей показала высокую значимость таких форм взаимодействия для усиления мотивации и вовлечённости в учебный процесс.

В целом, разработка курса по нанооптике нанопористых структур продемонстрировала, что успешное педагогическое проектирование в дистанционном формате требует комплексного подхода, включающего не только высококачественное содержание, но и интерактивные технологии, гибкую оценку знаний и активное взаимодействие между преподавателями и слушателями. Курс стал не только источником знаний, но и платформой для развития исследовательских и профессиональных компетенций, что подтверждает его эффективность и востребованность в современном образовании.

На основе анализа работ [1–12] показано, что курс нанооптики нанопористых структур обладает рядом преимуществ перед другими формами обучения, такими как гибкость графика, доступность и возможность обучения в удобное время.

Заключение

Результаты разработки дистанционного курса нанооптики нанопористых структур вносят вклад в развитие теории и методики дистанционного обучения в области фотоники, нанооптики и нанотехнологий.

Выводы по работе можно сформулировать следующим образом:

1. дистанционный курс нанооптики нанопористых структур в системе управления обучением MOODLE включает как теоретические модули, так и практические задания по нанофотонике и оптике нанопористых структур,
2. дистанционный курс нанооптики нанопористых структур 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 наноптике нанопористых структур в системе управления обучением MOODLE является динамичным процессом, который требует междисциплинарного подхода, сочетания педагогических и технологических решений для создания качественного образовательного продукта. Теоретические материалы курса по наноптике нанопористых структур систематизировали и актуализировали знания о нанооптике. Исследование дополняет педагогическую науку новыми подходами к разработке дистанционных курсов в области высокотехнологичных дисциплин по фотонике и нанотехнологиям. Разработанный курс по наноптике нанопористых структур может быть внедрён в программы высшего образования, что позволит расширить доступ к обучению в области фотоники и нанотехнологий.

Дистанционный курс нанооптики нанопористых структур построен с использованием модульной технологии построения курса, позволяющей эффективно управлять темпом продвижения по дистанционному курсу. Разработанный дистанционный курс позволяет применять смешанную технологию преподавания курса нанооптики нанопористых структур в университете. Технология дистанционного обучения становится всё более популярной и востребованной образовательной технологией в условиях непрерывного развития современных образовательных технологий. Технологии дистанционного обучения позволяют успешно использовать их для достижения высоких результатов в изучении курса нанооптики нанопористых структур. Результаты исследования могут быть использованы для разработки новых методик преподавания курса нанооптики.

Гипотеза исследования, состоящая в том, что если использовать специализированный дистанционный курс нанооптики нанопористых структур, интегрирующий теоретические материалы и практические задания, то можно повысить эффективность изучения нанооптики нанопористых структур, подтверждена полностью.

Задачи работы решены полностью.

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

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

Список использованных источников

1. Алтунин 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.

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 нанофизике 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 нанокомпозитных материалов в курсе по оптике тонкослойных и наноструктурных покрытий // Наука online. — 2022. — № 2 (19). — С. 18–30. — URL: https://elibrary.ru/wgfhkb.

5. Алтунин 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.

6. Алтунин К. К., Петрова Е. А. Разработка модульной структуры дистнционного курса «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. Тимченко В. М. Проектирование дистанционного курса по физике мезоскопических систем // Наука online. — 2023. — № 4 (25). — С. 80–90. — URL: http://nauka-online.ru/wp-content/uploads/2024/01/04252023-005.pdf.

9. Илюшкина Е. А. Разработка дистанционного курса по радиотехническим устройствам в школе // Наука online. — 2024. — № 4 (29). — С. 60–72. — URL: http://nauka-online.ru/wp-content/uploads/2024/12/04292024-006.pdf.

10. Павлова Е. С. Разработка дистанционного курса по квантовым точкам // Наука online. — 2025. — № 4 (33). — С. 1–21. — URL: http://nauka-online.ru/wp-content/uploads/2025/12/04332025-001.pdf.

11. Селюкова А. Д. Разработка дистанционного курса по оптическим нанотехнологиям // Наука online. — 2025. — № 3 (32). — С. 25–44. — URL: http://nauka-online.ru/wp-content/uploads/2025/10/03322025-003.pdf.

12. Селюкова А. Д. Исследование физических свойств топологических изоляторов // Наука online. — 2025. — № 2 (31). — С. 67–77. — URL: http://nauka-online.ru/wp-content/uploads/2025/07/02312025-004.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 78A10

Pedagogical design of a distance learning course on nanooptics of nanoporous structures in the learning management system MOODLE

A. D. Selyukova

Ulyanovsk State Pedagogical University, 432071, Ulyanovsk, Russia

Submitted May 18, 2026
Resubmitted May 20, 2026
Published June 30, 2026

Abstract. The results of developing a distance learning course on nanooptics of nanoporous structures 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 nanooptics of nanoporous structures in the learning management system MOODLE. The results of developing the structure and elements of the distance learning course on nanooptics of nanoporous structures in the learning management system MOODLE are described.

Keywords: course, distance learning course, nanooptics, nanoporous structure, modular technology, learning management system

References

1. Altunin K. K., Kolesova T. A. Development of distance learning course elements on physical nanoelectronics in the learning management system MOODLE // 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 learning management system MOODLE // 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 spasers 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 // Science online. — 2019. — no. 2 (7). — P. 15–32. — URL: https://elibrary.ru/omnoyk.

8. Timchenko V. M. Designing a distance learning course on the physics of mesoscopic systems // Science online. — 2023. — no. 4 (25). — P. 80–90. — URL: http://nauka-online.ru/wp-content/uploads/2024/01/04252023-005.pdf.

9. Ilyushkina E. A. Development of a distance learning course on radio-engineering devices at school // Science online. — 2024. — no. 4 (29). — P. 60–72. — URL: http://nauka-online.ru/wp-content/uploads/2024/12/04292024-006.pdf.

10. Pavlova E. S. Development of a distance learning course on quantum dots // Science online. — 2025. — no. 4 (33). — P. 1–21. — URL: http://nauka-online.ru/wp-content/uploads/2025/12/04332025-001.pdf.

11. Selukova A. D. Development of a Distance Learning Course on Optical Nanotechnology // Science onlin. — 2025. — no. 3 (32). — P. 25–44. — URL: http://nauka-online.ru/wp-content/uploads/2025/10/03322025-003.pdf.

12. Selyukova A. D. Study of the physical properties of topological insulators // Science onlin. — 2025. — no. 2 (31). — P. 67–77. — URL: http://nauka-online.ru/wp-content/uploads/2025/07/02312025-004.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

Научная статья
УДК 372.853
ББК 74.489
ГРНТИ 14.35.09
ВАК 5.8.2.
PACS 01.40.Di
OCIS 000.2060
MSC 83D05

Методика преподавания космологической инфляции в модифицированных теориях гравитации в курсе физике

М. А. Чернеев [1]

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

Поступила в редакцию 14 мая 2026 года
После переработки 16 мая 2026 года
Опубликована 30 июня 2026 года

Аннотация. Обсуждаемая методика преподавания космологической инфляции в модифицированных теориях гравитации может стать инновационной основой для подготовки учителей физики, обучающих как студентов, так и школьников в рамках профильных курсов. Использование гибридных подходов (например, сочетание общей теории относительности и $f(R)$-теорий гравитации) позволяет формировать у будущих учителей гибкое мышление, акцентируя внимание на альтернативных теориях гравитации, что развивает критическое отношение к стандартным моделям и стимулирует научную любознательность у учащихся. Методика позволяет интегрировать междисциплинарные связи, связывая физическую космологию с математическим анализом, историей науки (например, эволюцией идей от Эйнштейна к Старобинскому) и проблемам тонкой настройки Вселенной, что соответствует современным требованиям к компетентностному подходу в педагогическом образовании. Рассматриваются методические подходы к преподаванию физической космологии на примере инфляционных моделей в модифицированных теориях гравитации. Особое внимание уделяется теории Эйнштейна–Гаусса–Бонне, позволяющей связать фундаментальные вопросы ранней Вселенной с современными наблюдательными данными. Предлагается структура учебного курса, ориентированная на развитие исследовательских компетенций студентов педагогических специальностей с профилем по физике. Кроме того, ситуативные задачи на сравнение предсказаний различных теорий (например, от $f(R)$ до ΛCDM) могут быть использованы в практикумах, где студенты разрабатывают уроки по физике для старшеклассников, обучаясь методам активизации познавательной деятельности. Наконец, данная методика способствует повышению мотивации студентов педагогических вузов за счёт актуальности темы: обсуждение инфляции в модифицированных теориях гравитации привлекает внимание к передовым направлениям современной астрофизики, что особенно важно для формирования профессиональной идентичности будущих учителей физики.

Ключевые слова: космология, инфляция, модифицированная гравитация, теория Эйнштейна–Гаусса–Бонне, методика преподавания физики, высшее образование

[1] E-mail: makcn777@gmail.com

Введение

Физическая космология занимает важное место в системе подготовки учителей физики. Физическая космология основана на модели горячего Большого взрыва. Физическая космология успешно описывает расширение Вселенной, образование химических элементов и существование космического микроволнового фона. Развитие наблюдательной астрономии, регистрация гравитационных волн и высокоточные измерения параметров космического микроволнового фона требуют включения в образовательный процесс новейших достижений фундаментальной науки. После открытия космического микроволнового фона и уточнения параметров Вселенной возникла необходимость объяснения ряда фундаментальных проблем стандартной модели Большого взрыва. Наиболее успешным решением стала теория космологической инфляции, предполагающая существование стадии ускоренного расширения ранней Вселенной. Одним из наиболее значимых направлений современной космологии является теория космологической инфляции, объясняющая происхождение крупномасштабной структуры Вселенной и решающая основные проблемы стандартной модели Большого взрыва.

Инфляционная космология остаётся одной из самых динамично развивающихся областей теоретической физики, однако её совместимость с модифицированными теориями гравитации (например, $f(R)$, $f(T)$, скалярно-тензорными или высшими производными) требует систематического пересмотра. Теория космологической инфляции предполагает период быстрого и экспоненциального расширения Вселенной на ранних этапах её развития. Учёт нестандартных гравитационных эффектов в ранней Вселенной может привести к новым предсказаниям, объясняющим аномалии в спектре первичных возмущений или космологических параметрах, наблюдаемых современными космическими миссиями. Разработка адаптированных методик преподавания данной тематики становится актуальной в контексте интеграции альтернативных гравитационных моделей в образовательные стандарты физико-математических вузов.

Целью работы является разработка эффективной методики преподавания космологической инфляции в рамках модифицированных теорий гравитации для студентов, обучающихся по специальностям педагогического направления подготовки со специализацией в области физики.

Задачи исследования могут быть сформулированы следующим образом:

1. проанализировать ключевые отличия инфляционных сценариев в стандартной и модифицированной гравитации (например, роль дополнительных степеней свободы, изменение уравнений Эйнштейна),
2. создать адаптированные учебные материалы, включая решения упрощённых физических задач и визуализации динамики скалярного поля в неканонических моделях теории гравитации,
3. разработать алгоритм оценки наблюдательных последствий (спектр возмущений, тензор-модель зависимости) для конкретных модификаций теории гравитации.

Объектом исследования является процесс преподавания разделов физической космологии, посвящённых инфляционной эпохе, в контексте современных модифицированных теорий гравитации. Предметом исследования является методический подход в процессе преподавания физической космологии для формирования у студентов понимания физических механизмов космологической инфляции в альтернативных теориях гравитации, включая выбор математического аппарата, примеры и задачи.

Гипотеза научного исследования состоит в том, что эффективное освоение студентами темы инфляции в модифицированных теориях гравитации возможно при использовании модульной системы обучения, сочетающей анализ классических решений с интерактивными моделями нестандартных гравитационных эффектов.

Научная новизна исследования заключается в том, что предложенная методика впервые объединяет педагогические приёмы для преподавания инфляции в рамках $f(R)$, $f(T)$ и других модификаций, учитывая их специфические математические и физические особенности.

Теоретическая значимость исследования состоит в том, что работа вносит вклад в развитие дидактики фундаментальной физики, демонстрируя возможность адаптации сложных теоретических концепций для образовательных целей. Практическая значимость исследования состоит в том, что методика может быть внедрена в учебные планы педагогических университетов, повышая уровень подготовки специалистов для современных исследований в области преподавания астрономии, астрофизики и физической космологии.

Обзор

Космологическая инфляция является ключевой парадигмой современной космологии, объясняющая однородность и изотропию наблюдаемой Вселенной, а также происхождение первичных возмущений плотности, из которых впоследствии сформировалась крупномасштабная структура. Инфляционная теория, изначально предложенная А. Гутом и А. Старобинским, получила мощное подтверждение в данных спутников WMAP и Planck. В последние десятилетия значительный интерес вызывает изучение инфляции в рамках модифицированных теорий гравитации, где действие Эйнштейна-Гильберта обобщается различными способами. Преподавание этой сложной, но фундаментальной темы требует как глубокого понимания физических принципов, так и владения математическим аппаратом современных теорий гравитации.

Космологическая инфляция в физической космологии представляет собой период экспоненциального расширения Вселенной на ранних стадиях её эволюции, который описывается квази-деситтеровским решением с медленно меняющимся параметром Хаббла H. Ключевыми параметрами, характеризующими инфляцию, являются параметры медленного скатывания ϵ и η, которые должны быть много меньше единицы в течение инфляционной фазы [1]. Число e-фолдов N_e, измеряющее степень расширения, должно быть не менее 55-65 для решения проблем горизонта и плоскостности. Спектральный индекс скалярных возмущений n_s и тензор-скалярное отношение r являются наблюдаемыми величинами, которые позволяют проверять инфляционные модели. Согласно данным спутника Planck, $n_s = 0.9603 \pm 0.0073$ и $r < 0.11$ [1]. Эти наблюдательные ограничения служат важнейшим критерием для отбора наблюдаемых моделей инфляции.

В физической космологии модифицированные теории гравитации расширяют общую теорию относительности путём изменения гравитационного действия. К наиболее известным классам таких теорий относятся: $f(R)$-гравитация, где действие содержит произвольную функцию скалярной кривизны R. Как отмечается в обзоре, этот класс теорий особенно важен, поскольку он может быть преобразован к скалярно-тензорной форме путём конформного преобразования, что позволяет изучать инфляцию в формализме единого скалярного поля (инфлатона) [2]. Модель Старобинского $f(R) = R + \alpha R^2$ является наиболее известным примером инфляции в модифицированной гравитации и остаётся одной из наиболее согласованных с данными космической миссии Planck [3].

$f(R,T)$-гравитация обобщает $f(R)$-теорию, включая зависимость от следа тензора энергии-импульса T. Это позволяет учитывать минимальную связь между материей и геометрией [4]. В рамках этой теории возможно описание как ранней инфляции, так и позднего ускоренного расширения Вселенной.

Телепараллельные теории ($f(T)$ и $f(T,\mathcal{T})$) основаны на кручении вместо кривизны и являются альтернативной формулировкой гравитации. В таких теориях гравитаци-

онное поле описывается тензором кручения, а не тензором Римана [5].

Скалярно-тензорные теории, включая теории Хорндески, представляют собой наиболее общие Лоренц-инвариантные теории с уравнениями движения второго порядка [6].

В $f(R)$-гравитации инфляция может быть реализована несколькими способами. Наиболее известный — модель Старобинского, где квадратичный член R^2 доминирует при высоких кривизнах, обеспечивая квази-деситтеровскую фазу, а линейный член R завершает инфляцию при уменьшении кривизны [1]. С помощью метода конформного преобразования $f(R)$-гравитация в форме Жордана может быть преобразована в скалярно-тензорную теорию в форме Эйнштейна, где инфлатон ϕ описывается потенциалом $V(\phi) \approx \left(1 - e^{-\sqrt{2/3}\kappa\phi}\right)^2$ [2].

Обобщённые модели включают степенные поправки к общей теории относительности вида $f(R) = R + \gamma R^{2-n}$, где $0 < n < 2$. Для таких моделей спектральный индекс и тензор-скалярное отношение могут быть согласованы с данными миссии Planck при определённых значениях параметров [2].

В работе [4] исследуется инфляция в $f(R,T)$-теории для двух конкретных моделей: $f(R,T) = R + \gamma R^2 + \lambda T$ и $f(R,T) = R + \alpha T + \beta T^2$. Показано, что при соответствующих значениях свободных параметров наблюдаемые величины (тензор-скалярное отношение r, спектральный индекс n_s, его бег α_s) могут быть совместимы с данными Planck и BICEP2/Keck Array. В таких моделях возможна реализация как фантомной, так и квинтэссенциальной тёмной энергии, что объединяет раннюю инфляцию с поздним ускорением Вселенной.

В телепараллельном подходе $f(T,\mathcal{T})$, где T – скаляр кручения, а $\mathcal{T}$ – след тензора энергии-импульса, также возможна успешная инфляция. В работе [5] показано, что для модели $f(T,\mathcal{T}) = \alpha T + \beta\mathcal{T}$ при медленном скатывании параметры инфляции (r, n_s, α_s) согласуются с наблюдениями. Параметр замедления q в такой модели демонстрирует переход от замедления к ускорению, что объясняет не только инфляцию, но и позднее ускорение.

Теории гравитации с высшими производными, такие как $f(R^2, P, Q)$-гравитация (где $P = R_{\mu\nu}R^{\mu\nu}$, $Q = R_{\mu\nu\rho\sigma}R^{\mu\nu\rho\sigma}$), также могут описывать инфляцию. В статье [7] исследована хаотическая инфляция в таких моделях и показали, что для массивного скалярного поля с квадратичным потенциалом возможна реализация инфляции, согласующейся с данными, хотя значение тензор-скалярного отношения может превышать ограничения Planck.

Современный подход к преподаванию космологической инфляции в модифицированных теориях гравитации включает использование формализма эффективной теории поля. В статье [6] разработан общий подход эффективной теории поля для описания тензорных возмущений на фоне стандартной космологической модели, который охватывает широкий класс теорий: от скалярно-тензорных до гравитации Хоравы-Лифшица. Этот подход особенно полезен для педагогических целей, поскольку позволяет описывать различные модификации гравитации.

При преподавании космологической инфляции в модифицированных теориях гравитации необходимо последовательно вводить следующие концепции: стандартная инфляция в общей теории относительности с параметрами медленного скатывания, спектрами возмущений, данными Planck [1], конформные преобразования на основе перехода между формой Жордана и формой Эйнштейна, демонстрация эквивалентности $f(R)$-гравитации и скалярно-тензорных теорий [2], методы реконструкции для восстановления формы $f(R)$ по заданному потенциалу инфлатона или по наблюдательным данным [1, 2], нестабильность Остроградского, в которой некоторые модификации гравитации приводят к призрачным модам, а $f(R)$-теории — нет [8], экранирующие механизмы:

хамелеон, симметрон, Вайнштейна — как модифицированные теории гравитации согласуются с локальными тестами [8, 9].

Фундаментальный обзор в работе [9] предоставляет всестороннее введение в модифицированные теории гравитации и их космологические следствия, включая инфляцию. Этот обзор может служить основным учебным пособием для аспирантов и исследователей.

В работе [8] даётся доступное введение в предмет, начиная с тестов общей теории относительности и заканчивая современными теориями. Особое внимание уделяется нестабильности Остроградского, что критически важно для понимания ограничений на построение наблюдаемых моделей.

При преподавании рекомендуется начинать с модели Старобинского как простейшего примера инфляции в модифицированной гравитации [1, 3], использовать конформное преобразование для демонстрации связи между $f(R)$-гравитацией и стандартной инфляцией со скалярным полем [2], изучать наблюдательные ограничения (n_s, r) как критерий отбора моделей, рассматривать как минимум два класса модифицированных теорий: $f(R)$ и $f(R,T)$ для демонстрации разнообразия подходов [2, 4], включать обсуждение экранирующих механизмов для связи с экспериментальными ограничениями [8, 9].

Несмотря на успехи инфляционных моделей в модифицированных теориях гравитации, остаются открытые вопросы. Как отмечается в обзоре [1], наблюдательные данные Planck накладывают жёсткие ограничения на тензор-скалярное отношение $r < 0.11$, что исключает многие модели с большими значениями r. Однако будущие эксперименты по B-модовой поляризации, такие как LiteBIRD, позволят ещё сильнее ограничить или обнаружить гравитационные волны инфляционного происхождения [6].

Важным педагогическим аспектом является демонстрация того, что различные модифицированные теории гравитации могут быть сведены к единому формализму эффективной теории поля, что даёт студентам целостное представление о современном состоянии исследований в этой области.

Преподавание космологической инфляции в модифицированных теориях гравитации требует междисциплинарного подхода, объединяющего общую теорию относительности, космологию возмущений и современные методы квантовой теории поля. Обзорные работы [1, 2, 8, 9] предоставляют необходимую базу для построения учебных курсов, а конкретные модели [4–7] демонстрируют разнообразие подходов к описанию ранней Вселенной в рамках модифицированной гравитации.

В школах и университетах гравитацию преподают, по сути, в ньютоновском ключе. Ньютоновская механика возникла во времена, когда не существовало полей, когда энергия не была физической величиной, и когда приходилось довольствоваться концепцией действия на расстоянии. Теория, лишенная таких недостатков, — электромагнетизм Максвелла — появилась примерно 150 лет спустя. Она могла бы послужить моделью для современной теории гравитации. В действительности, такая теория гравитации, гравитоэлектромагнетизм, была предложена Хевисайдом. Однако она не получила развития, поскольку, во-первых, многие описываемые ею эффекты очень и очень малы; во-вторых, она содержит некоторые утверждения, которые кажутся неприемлемыми для некоторых исследователей; и в-третьих, вскоре после этого появилась общая теория относительности, которая устранила старые недостатки и, казалось, сделала классическую теорию гравитации излишней. В статье [10] утверждается, что тема гравитоэлектромагнетизма является законной для преподавания в школах и университетах даже сейчас. С одной стороны, общая теория относительности непрактична для многих приложений из-за больших математических затрат, а с другой стороны, теория гравитоэлектромагнетизма отнюдь не описывает лишь мельчайшие эффекты. Скорее,

она решает проблему, которая намеренно игнорируется в традиционном преподавании ньютоновской механики: к какой системе в статье [10] относят так называемую потенциальную энергию? В статье [10] также сталкиваются с некоторыми особенностями гравитоэлектромагнетизма, которые обусловлены тем, что сжимающие и растягивающие напряжения в гравитационном поле меняются местами по сравнению с электромагнитным полем.

В статье [11] было показано, что концептуальные карты оказывают положительное влияние на качество обучения студентов в различных дисциплинарных контекстах и на разных уровнях образования, от начальной школы до университета, помогая студентам связывать идеи и развивать продуктивную структуру знаний для поддержки дальнейшего обучения. Однако оценка концептуальных карт всегда была спорным вопросом. Некоторые авторы сосредотачиваются на количественной оценке карт, в то время как другие предпочитают более описательное определение качества карт. Насколько нам известно, ранее не рассматривались концептуальные карты с точки зрения оценки различных типов знаний (например, процедурных и концептуальных), заложенных в концептуальной карте, или способов их взаимодействия. В статье [11] рассматриваются карты, используя подход, предлагаемый теорией кода легитимации, для анализа концептуальных карт с точки зрения семантической значимости и семантической плотности. Качественно, переплетая эти понятия, в статье [11] рассматриваются различные знания, необходимые для достижения профессиональных знаний или экспертного понимания. В статье [11] примеры карт используются в качестве иллюстраций того, как студенты могут направлять своё обучение к экспертному уровню и как это проявляется в их концептуальных картах. Включены выводы, касающиеся разработки учебных программ и оценки качества преподавания.

Возможность реализации инфляции Хиггса в модели с малой неминимальной константой связи, продемонстрированная недавно, даёт основания для дальнейшего развития модели. Включение электромагнитной стандартной модели в двухмерную теорию таким образом, чтобы полностью учитывать структуру двухмерной теории, приводит к теории, которую в статье [12] называют двухмерной стандартной моделью. Двухмерная стандартная модель реализуется в контексте космологии как набор космологически модифицированных копий теории Глэшоу-Вейнберга-Салама, причём каждая из копий существует как локальная квантовая теория поля, определённая на классическом космологическом фоне на соответствующем этапе его эволюции. Эта основная идея подробно изучается для двух этапов эволюции космологического фона: для медленной инфляции и для этапа приближения к вакууму. В основном из-за наличия отношения двух объёмных мер во всех уравнениях движения все константы связи двухмерной стандартной модели превращаются в своего рода «бегущие» (классические) эффективные параметры двухмерной теории. В статье [12] показано, что благодаря этим результатам классического уровня учёт квантовых поправок в однопетлевом приближении сохраняет режим медленной инфляции и не нарушает вакуумную стабильность во время инфляции.

В статье [13] предложена модифицированная релятивистская динамическая модель для частицы, подвергающейся собственному ускорению a, погружённой в вакуумный фон с температурой T. В рамках этой модели эффект Унру диктует, что ускоренный наблюдатель воспринимает вакуум как тепловую ванну. Связывая планковскую температуру T_P и соответствующий ей энергетический масштаб E_P с инвариантным максимальным планковским ускорением a_P, переформулируем динамику в рамках двойной специальной теории относительности. В этой модели тепловой фон, вызванный ускорением, действует как физически предпочтительная система отсчёта, требующая квантово-гравитационной поправки к эквивалентности массы и энергии $E = mc^2$. Это

выведение приводит к дисперсионному соотношению Магуэйхо-Смолина, здесь переинтерпретированному через космологическо-термодинамическую призму, где тепловой вакуум динамически возникает из ускорения частиц. Кроме того, в статье [13] продемонстрировано, что скорость света расходится при $T \to T_P$ в ранней Вселенной, движимая инфляцией на планковском масштабе ускорения. Быстрое уменьшение скорости света c в эпоху инфляции предоставляет новый механизм для теорий с переменной скоростью света, предлагая надёжную альтернативу для решения проблемы горизонта.

В статье [14] представлен краткий обзор последних достижений в энтропийной космологии, основанных на двух термодинамических законах видимого горизонта, а именно первом и втором законах термодинамики. Первый закон, по сути, описывает изменение энтропии видимого горизонта в ходе космической эволюции Вселенной; в частности, он выражается формулой $TdS = -d(\rho V) + WdV$ (где W – плотность работы, а другие величины имеют свои обычные значения). Таким образом, первый закон фактически связывает различные теории гравитации с энтропией видимого горизонта. Это приводит к естественному вопросу: «Какова форма энтропии горизонта, соответствующая общей модифицированной теории гравитации?». Второй закон термодинамики горизонта гласит, что изменение полной энтропии (суммы энтропии горизонта и энтропии полей материи) относительно космического времени должно быть положительным, при этом поля материи ведут себя как открытая система, характеризующаяся ненулевым химическим потенциалом. Второй закон термодинамики горизонта, что важно, предоставляет независимые от модели ограничения на энтропийные параметры. В заключение в статье [14] обсуждается точка зрения энтропийной космологии на инфляцию (или отскок), перегрев и первичные гравитационные волны с позиции обобщенной функции энтропии.

Жизнеспособная эра доминирования излучения в ранней Вселенной лучше всего описывается стандартной моделью космологии. В статье [15] демонстрируется реконструкция форм $f(R)$ в модифицированной теории гравитации и метрически совместимой $f(T)$ вместе с симметричной $f(Q)$ в альтернативных телепараллельных теориях гравитации с разных точек зрения, в первую очередь, делая акцент на жизнеспособной стандартной модели космологии эры доминирования излучения. В статье [15] космологическая инфляция также была изучена для конкретного выбора скалярного потенциала. В статье [15] обнаружено, что параметры космологической инфляции достаточно хорошо согласуются с недавно опубликованными наблюдательными данными.

В статье [16] предлагается новая гравитационная теория, вдохновлённая теориями струн, в четырёх измерениях пространства-времени, представляющая собой сумму модифицированной $(R + \alpha R^2)$ гравитации, мотивированной инфляцией Старобинского, и ведущей поправки Бель-Робинсона-тензор-квадрат к гравитационному эффективному действию суперструн и М-теории, компактифицированной до четырёх измерений. Раскрывается возможное происхождение теории из более высоких измерений. Предложенное действие Старобинского-Беля-Робинсона имеет только два свободных параметра, что делает его пригодным для проверяемых физических приложений в физике чёрных дыр, космологической инфляции и излучении Хокинга.

В статье [17] рассматривается развитие релятивистской космологии и введение в неё инфляции как экспоненциально расширяющейся ранней фазы Вселенной. В статье [17] изучаются свойства стандартной космологической модели, разработанной в рамках релятивистской космологии, и геометрическая структура пространства-времени, когерентно связанная с ней. В статье [17] дополнительно исследуются геометрические свойства пространства и пространства-времени, заложенные в стандартной космологической модели. Модель Большого взрыва как начала Вселенной основана на стандартной модели, которая не смогла объяснить плоскость и крупномасштабную однородность

Вселенной, как это демонстрируют наблюдательные данные. Эти космологические проблемы были решены путём введения короткой фазы ускоренного расширения в самой ранней Вселенной, известной как инфляция. Космическая инфляция, устанавливающая начальные условия стандартной модели Большого взрыва, решает эти проблемы теории. В статье [17] обсуждается, как инфляционная парадигма решает эти проблемы, предлагая период быстрого расширения в ранней Вселенной. В статье [17] также рассматриваются инфляция и тёмная энергия в модифицированной $f(R)$-гравитации.

Научное содержание темы

Инфляционная стадия характеризуется ускоренным расширением пространства:

$$a(t) \propto e^{Ht}\,, \tag{1}$$

где $a(t)$ — масштабный фактор, а H — параметр Хаббла. Космологическая инфляция позволяет объяснить проблему горизонта, проблему плоскостности.

Для решения проблем физической космологии была предложена инфляционная стадия расширения Вселенной. В течение очень короткого промежутка времени масштабный фактор возрастал экспоненциально:

$$a(t) = a_0 e^{Ht}\,. \tag{2}$$

Количество e-фолдов определяется выражением

$$N = \ln \frac{a_f}{a_i}\,. \tag{3}$$

Для успешной инфляции обычно требуется $N \approx 50 - 60$. Стандартная теория относительности Эйнштейна прекрасно описывает галактики и чёрные дыры, но когда дело доходит до космологической инфляции или тёмной энергии, необходимо использовать модифицированные теории гравитации.

Несмотря на успех инфляционной модели, остаются вопросы о происхождении инфлатона и квантовых поправках. Это привело к развитию модифицированных теорий гравитации: $f(R)$-гравитация, скалярно-тензорных теорий гравитации, теории Эйнштейна–Гаусса–Бонне. В настоящее время активно исследуются инфляционные модели в рамках модифицированных теорий гравитации. Одной из наиболее перспективных является теория Эйнштейна–Гаусса–Бонне. Действие в теория Эйнштейна–Гаусса–Бонне записывается в виде

$$S = \int d^4x\sqrt{-g}\left[\frac{M_{\rm Pl}^2}{2}R - \frac{1}{2}(\partial\phi)^2 - V(\phi) - \frac{1}{2}\xi(\phi)\,\mathcal{G}\right]\,. \tag{4}$$

Здесь

$$\mathcal{G} = R^2 - 4R_{\mu\nu}R^{\mu\nu} + R_{\mu\nu\rho\sigma}R^{\mu\nu\rho\sigma} \tag{5}$$

является инвариантом Гаусса–Бонне. Связь функции $\xi(\phi)$ со скалярным полем приводит к изменению инфляционной динамики. Основными характеристиками инфляционных моделей являются спектральный индекс n_s и тензорно-скалярное отношение r. Согласно современным наблюдениям $n_s \approx 0.965$, $r < 0.036$. Многие модели теории Эйнштейна–Гаусса–Бонне успешно удовлетворяют этим ограничениям.

Модифицированные теории гравитации предлагают альтернативные объяснения ускоренному расширению Вселенной без введения тёмной энергии в форме космологической постоянной. Ключевым инструментом для тестирования таких теорий являются

наблюдательные последствия на фоне возмущений метрики и скалярных полей. Алгоритм оценки этих последствий включает три взаимосвязанных этапа: построение динамических уравнений для фона и возмущений, анализ спектра первичных возмущений (скалярных, векторных и тензорных) и вычисление статистических характеристик (например, спектра мощности, корреляционных функций, анизотропии реликтового излучения и слабых линз). Здесь представлен обобщённый алгоритм для классов модифицированных теорий гравитации, включающих $f(R)$-гравитацию, скалярно-тензорные теории, а также теории с дополнительными полями (например, $f(T)$, где T – скалярная торсионная кривизна).

Рассмотрим обобщённую теорию гравитации с действием, включающим произвольную функцию от скаляра кривизны R и других инвариантов:

$$S = \frac{1}{16\pi G}\int \mathrm{d}^4x\sqrt{-g}\, f\left(R, \mathcal{X}, \dots\right) + S_{\text{mat}}\ , \tag{6}$$

где $\mathcal{X}$ может обозначать, например, скалярную кривизну торсиона или дополнительные поля. Вариационный принцип приводит к одифицированным уравнениям Эйнштейна с эффективным тензором энергии-импульса:

$$G_{\mu\nu} = 8\pi G\, T^{\text{eff}}_{\mu\nu} = 8\pi G\, T^{\text{материя}}_{\mu\nu} + T^{f}_{\mu\nu}\ , \tag{7}$$

где $T^{f}_{\mu\nu}$ – вклад от дополнительных членов действия. Для $f(R)$-гравитации он имеет вид:

$$T^{f}_{\mu\nu} = \frac{1}{8\pi G}\left[\nabla_\mu\nabla_\nu f_R - g_{\mu\nu}\Box f_R + g_{\mu\nu}\frac{f - Rf_R}{2}\right]\ , \tag{8}$$

где $f_R = \partial f/\partial R$. В случае однородного и изотропного фона уравнения для $H(a)$ и $f_R(a)$ записываются как система обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$3H^2 = 8\pi G\rho_{\text{mat}} + \frac{Rf_R - f}{2}\ , \quad \dot{H} = -4\pi G(\rho_{\text{mat}} + p_{\text{mat}}) + \frac{\dot{R}f_{RR}}{2}\ , \tag{9}$$

где $R = 6\left(\dot{H} + H^2\right)$, а $f_{RR} = \partial^2 f/\partial R^2$. Решение этой системы даёт эффективный параметр состояния w_{eff}, определяемый через $p_{\text{eff}} = w_{\text{eff}}\rho_{\text{eff}}$, где $\rho_{\text{eff}} = \rho_{\text{mat}} + \rho_f$, а ρ_f – плотность энергии, связанная с $f(R)$.

Разложим метрику и скалярные поля по линейным возмущениям в синхронных гауссовых координатах:

$$\mathrm{d}s^2 = -a^2(\tau)\left[(1+2\Phi)\mathrm{d}\tau^2 - (1-2\Psi)\delta_{ij}\mathrm{d}x^i\mathrm{d}x^j\right]\ , \tag{10}$$

где Φ и Ψ – скалярные возмущения Ньютона и кривизны соответственно. Для скалярно-тензорных теорий вводим также возмущение скалярного поля $\delta\phi$. Линейные уравнения для возмущений получаются из действия путем разложения до первого порядка по малым параметрам. Например, для $f(R)$-гравитации уравнения для Φ и Ψ принимают вид:

$$k^2\Psi = 4\pi G a^2\left(\delta\rho_{\text{материя}} + \frac{k^2}{a^2}\delta q - 3H\delta\dot{q}\right) + \frac{k^2}{a^2}f_R\Phi + \frac{1}{2}\left(R - f_R R\right)\Phi\ , \tag{11}$$

$$\ddot{\Psi} + 3H\dot{\Psi} + \left(2\dot{H} + \frac{k^2}{a^2}\right)\Psi = 4\pi G\delta p_{\text{mat}} + \frac{1}{2}\dot{f}_R\dot{\Phi} + \varphi(\delta q)\ , \tag{12}$$

где $\varphi(\delta q)$ – возмущение дополнительного скалярного поля, связанного с f_R. Векторные и тензорные моды в модифицированной теории гравитации часто совпадают с обобщённой теорией относительности на фоне, но их спектры могут модифицироваться из-за дополнительных кинетических членов.

В рамках инфляционной парадигмы первичные возмущения генерируются квантовыми флуктуациями скалярного поля инфлятона $\delta\phi$. В модифицированной теории гравитации спектр скалярных возмущений определяется через модифицированную функцию передачи T_k:

$$\mathcal{P}_{\mathcal{R}}(k) = |T_k|^2 \mathcal{P}_{\mathcal{R}}^{\mathrm{GR}}(k) \ , \tag{13}$$

где $\mathcal{P}_{\mathcal{R}}^{\mathrm{GR}}(k) = \frac{H^2}{2\pi\dot{\phi}^2}$ – спектр в теории относительности, а T_k учитывает вклад дополнительных полей. Для $f(R)$-гравитации:

$$T_k \approx 1 + \frac{3}{2}\frac{H^2}{\dot{H}} f_{RR} k^2 + \mathcal{O}\left(k^4\right) \ , \tag{14}$$

что приводит к модификации спектра на больших масштабах (малые k). В скалярно-тензорных теориях спектр зависит от параметра $omega_{\mathrm{BD}}$, который контролирует кинетическую часть скалярного поля:

$$\mathcal{P}_{\mathcal{R}}(k) \approx \frac{H^2}{2\pi\dot{\phi}^2}\left(1 + \frac{2}{\omega_{\mathrm{BD}}}\right) \ . \tag{15}$$

В модифицированной теории гравитации тензорные моды (гравитационные волны) часто сохраняют спектр теории относительности на больших масштабах, но их дисперсионные соотношения могут модифицироваться. Например, в $f(R)$-гравитации фазовая скорость тензорных возмущений c_T отличается от скорости света:

$$c_T^2 = 1 - \frac{1}{2} f_{RR}\frac{\dot{R}}{H} + \mathcal{O}\left(f_{RR}^2\right) \ . \tag{16}$$

Это приводит к изменению спектра гравитационных волн на малых масштабах и может быть ограничено данными по микролинзированию или стоксовым параметрам реликтового излучения.

Наблюдательные последствия модифицированной гравитации часто параметризуются через тензор-модель зависимости, связывающую возмущения метрики с источниками:

$$\Phi = \mu(k,a)\,\Phi_{\mathrm{GR}}, \quad \Psi = \gamma(k,a)\,\Psi_{\mathrm{GR}} \ , \tag{17}$$

где μ и γ – функции роста и скейлинга соответственно. Для $f(R)$-гравитации на поздних стадиях (массивный гравитон):

$$\mu(k,a) \approx 1 - \frac{1}{3}\frac{k^2}{a^2H^2} f_{RR} \ , \quad \gamma \approx 1 + \frac{2}{3}\frac{k^2}{a^2H^2} f_{RR} \ . \tag{18}$$

Эти функции определяют отклонения от теории относительности в распределении галактик, функции корреляции и анизотропии реликтового излучения.

Наблюдательные тесты включают анализ спектра мощности галактик $P(k)$, где отклонения от ΛCDM параметризуются через $\Sigma(k) = \mu^2(k)\,\Sigma_{\mathrm{GR}}(k)$. Например, для $f(R)$-гравитации на масштабах $k \sim 0.1\,h/$Мпк ожидается подавление мощности на $\sim 10\,\%$. Наблюдательные тесты включают измерение анизотропии реликтового излучения через спектр C_ℓ, где модификации гравитации влияют на пики акустических осцилляций через интегралы типа:

$$\Delta C_\ell \propto \int \mathrm{d}\ln k\, \mathcal{P}_{\mathcal{R}}(k) W_\ell(k) \left[\mu(k,a)^2 - 1\right] \ , \tag{19}$$

где $W_\ell(k)$ – ядро перехода. Наблюдательные тесты включают эффекты слабых линз (например, в данных CFHTLenS или DES), где модифицированная гравитация изменяет потенциал гравитационного линзирования как $\Phi_{\text{lens}} = \mu(k)\,\Phi_{\text{GR}}$. Современные данные (например, от Planck, DES, KiDS) позволяют наложить ограничения на параметры модифицированных теорий гравитации. Для $f(R)$-гравитации типичные ограничения на $|f_{RR}|$ лежат в диапазоне $10^{-5} - 10^{-6}$ Мпк^2, что соответствует массе гравитона $m_g \sim 10^{-28}$ эВ. В скалярно-тензорных теориях параметр Бранса-Дике ω_{BD} ограничен как $\omega_{\text{BD}} > 4 \times 10^4$ по данным по скорости звука в барионном акустическом осцилляторе.

Для практической оценки наблюдательных последствий предлагается следующий алгоритм. На первом этапе решается система уравнений фона для конкретной модифицированной теории гравитации (например, $f(R)$) с заданными начальными условиями (например, H_0, $\Omega_{m,0}$, $\Omega_{f,0}$). Это позволяет определить эффективные параметры состояния $w_{\text{eff}}(a)$ и траекторию $f_R(a)$. Далее строится система линейных уравнений для возмущений Φ, Ψ, $\delta\phi$ и других динамических переменных. Для этого используются численные методы (например, метод Рунге-Кутта для обыкновенных дифференциальных уравнений или спектральные методы для интегральных уравнений). Важно учитывать граничные условия: на больших масштабах ($k \to 0$) возмущения должны соответствовать условиям однородности, а на малых ($k \to \infty$) должны соответствовать условиям затухания. На третьем этапе вычисляются спектры мощности и корреляционные функции для различных наблюдательных проб. Например, для функции корреляции галактик используется формула:

$$\xi(r) = \int \frac{\mathrm{d}k}{k} \frac{\sin(kr)}{kr} \mu(k)^2 P_{\text{GR}}(k) \ , \tag{20}$$

где $P_{\text{GR}}(k)$ – спектр в теории относительности, а $\mu(k)$ – функция роста, зависящая от модели. Наконец, полученные предсказания сравниваются с астрофизическими данными. Алгоритм оценки наблюдательных последствий модифицированных теорий гравитации включает последовательное решение уравнений фона и возмущений, анализ спектров первичных и вторичных возмущений, а также сравнение с экспериментальными данными. Ключевые модификации по сравнению с теорией относительности проявляются в изменении динамики фона через эффективный параметр состояния w_{eff}, что влияет на $H(a)$ и возраст Вселенной, модификации спектра первичных возмущений, особенно на больших масштабах, где вклад дополнительных полей (например, f_R) становится значимым, отклонениях в тензор-модели зависимости, проявляющихся в функции корреляции галактик, слабых линзах и анизотропии реликтового излучения, уникальных сигнатурах в гравитационных волнах, таких как изменение фазовой скорости или дисперсии. Перспективные направления включают развитие гибридных моделей (например, $f(R)$ и скалярные поля), учёт нелинейных эффектов в структуре формирования и анализ данных будущих космических миссий (Euclid, LSST, LISA). Важно также развивать универсальные формализмы параметризации, которые позволяют объединить различные модифицированные теории гравитации в единую наблюдательную схему.

Методические особенности преподавания космологии

При изучении космологической инфляции в рамках курса физической космологии и модифицированных теорий гравитации преподаватель сталкивается с необходимостью преодоления существенного разрыва между привычными для студентов представлениями классической физики и глубоко неинтуитивными концепциями релятивистской космологии. Высокая степень математической абстракции, требующая уверенного владения аппаратом тензорного анализа и дифференциальной геометрии, сочетается с

потребностью интерпретировать результаты в терминах наблюдаемой Вселенной, что формирует комплексную методическую задачу. Успешное освоение темы предполагает не только усвоение формализма уравнений Эйнштейна и их решений в однородно-изотропном приближении, но и развитие способности критически сопоставлять теоретические предсказания с данными наблюдений — от анизотропии реликтового излучения до крупномасштабной структуры материи. Именно эта двойственность, объединяющая строгий математический вывод и эмпирическую верификацию, определяет специфику построения учебного процесса и требует продуманной поэтапной подачи материала.

На первом этапе обучения, ориентированном на повторение основ общей теории относительности и космологии Фридмана, акцент делается на восстановлении и систематизации базовых понятий, которые зачастую оказываются фрагментарными у студентов даже физических специальностей. В ходе занятий последовательно раскрываются геометрический смысл гравитационного взаимодействия, роль метрического тензора как динамической переменной и физический смысл уравнений Эйнштейна, связывающих геометрию пространства-времени с распределением энергии и импульса. Особое внимание уделяется выводу уравнений Фридмана из общей теории относительности, при этом преподаватель стремится продемонстрировать логическую цепочку перехода от общего формализма к частным случаям однородной и изотропной Вселенной. Параллельно студенты осваивают космологические параметры такие, как параметр Хаббла, плотность энергии различных компонент, кривизну пространства, а также учатся оперировать этими параметрами в рамках стандартных моделей. Практические задания на этом этапе включают решение уравнений Фридмана для различных типов материи и энергии, анализ поведения масштабного фактора и построение качественных диаграмм эволюции Вселенной, что позволяет закрепить понимание связи между математическими решениями и физическими сценариями.

Второй этап посвящён рассмотрению физических проблем стандартной космологической модели, и здесь методически важно не просто перечислить трудности, но и показать, как каждая из них логически вытекает из принятых предположений и наблюдательных данных. Студенты учатся анализировать проблему горизонта, связанную с однородностью реликтового излучения, проблему плоскостности, указывающую на тонкую настройку начальных условий, и проблему монополей, возникающую в контексте теорий великого объединения. Обсуждение этих проблем строится вокруг вопроса о том, насколько внутренне согласованной оказывается стандартная модель без дополнительных механизмов, и как наблюдательные данные вынуждают искать расширения существующей теоретической базы. На занятиях активно используются численные оценки, позволяющие студентам самостоятельно убедиться в масштабах расхождения между предсказаниями стандартной модели и наблюдениями. Важным элементом методики становится работа с реальными данными, например, с картами анизотропии космического микроволнового фона, что помогает преодолеть абстрактность теоретических рассуждений и увидеть, как эмпирические факты формируют направление теоретических поисков.

Переход к третьему этапу, связанному с введением инфляционного механизма и обсуждением простейших инфлатонных моделей, требует особой методической осторожности, поскольку здесь студенты впервые сталкиваются с концепцией экспоненциального расширения Вселенной на ранних стадиях её эволюции. Преподаватель должен не только изложить формализм скалярного поля, играющего роль инфлатона, но и помочь студентам развить интуитивное понимание того, как динамика этого поля приводит к решению упомянутых выше проблем. В лекционном курсе последовательно разбираются условия медленного скатывания, определяющие продолжительность инфляции, и связь параметров потенциала инфлатона с наблюдаемыми величинами — спектром

первичных возмущений и отношением тензорных к скалярным модам. Семинарские занятия на этом этапе часто включают численное моделирование эволюции инфлатонного поля и расчёт спектральных индексов, что позволяет студентам увидеть, как небольшие изменения в форме потенциала отражаются на космологических предсказаниях. Существенную роль играет также обсуждение наблюдательных ограничений на инфляционные модели, основанных на данных спутника Planck, что демонстрирует студентам, как теория подвергается эмпирической проверке и как неопределённости в данных влияют на выбор допустимых моделей.

Четвёртый этап, посвящённый изучению современных модифицированных теорий гравитации, представляет собой наиболее сложную методическую задачу, поскольку здесь студентам приходится осваивать альтернативные подходы к описанию гравитационного взаимодействия, выходящие за рамки общей теории относительности. В рамках курса рассматриваются такие направления, как $f(R)$-гравитация, теории с дополнительными скалярными полями, модели массивной гравитации и другие расширения стандартного формализма. Преподавание строится таким образом, чтобы студенты не просто запоминали уравнения новых теорий, но и понимали мотивацию их введения — будь то стремление объяснить ускоренное расширение Вселенной без привлечения тёмной энергии, необходимость согласования гравитации с квантовыми принципами или желание устранить сингулярности в космологических решениях. На лекциях особое внимание уделяется анализу структуры полевых уравнений, выявлению новых степеней свободы и обсуждению условий, при которых модифицированные теории сводятся к общей теории относительности в известных пределах. Практическая составляющая этого этапа включает сравнение предсказаний различных теорий с наблюдательными данными, анализ стабильности решений и поиск потенциальных противоречий, что развивает у студентов навыки критического анализа теоретических моделей. Важным методическим приёмом становится проведение параллелей между различными подходами, выявление общих черт и принципиальных различий, что способствует формированию целостного представления о современном состоянии теории гравитации.

Существенную роль в методической структуре курса играет интеграция численных методов и работы с данными, поскольку именно эти навыки позволяют студентам перейти от абстрактных формул к реальным исследовательским задачам. Включение в программу коротких вычислительных проектов, связанных с моделированием космологической эволюции или анализом наблюдательных данных, способствует лучшему усвоению материала и развитию профессиональных компетенций. При этом преподаватель должен тщательно подбирать задачи, обеспечивая баланс между вычислительной сложностью и педагогической ценностью, чтобы студенты могли сосредоточиться на физическом смысле результатов, а не на технических деталях реализации. Дополнительным элементом методики становится обсуждение философских и методологических аспектов космологии — таких как роль антропного принципа, интерпретация мультивселенной или границы применимости научных теорий, — что позволяет студентам осознать место космологии в общей картине научного знания и развить критическое мышление.

Важным аспектом преподавания является также учёт междисциплинарных связей, поскольку физическая космология и модифицированные теории гравитации находятся на пересечении физики, математики и астрономии. Включение в курс элементов истории науки, рассказывающих о развитии космологических идей от античности до наших дней, помогает студентам увидеть эволюцию концепций и понять, как научные парадигмы сменяют друг друга под влиянием новых данных и теоретических прорывов. Параллельное обращение к математическим методам, выходящим за рамки стандартного университетского курса, таким как вариационное исчисление, теория групп или

функциональный анализ, расширяет инструментарий студентов и подготавливает их к самостоятельной исследовательской работе. Наконец, использование современных образовательных технологий — от интерактивных визуализаций кривизны пространства-времени до онлайн-платформ для численного моделирования — делает сложные концепции более доступными и способствует активному вовлечению студентов в учебный процесс. Такой комплексный подход, сочетающий строгую математическую подготовку, работу с данными, исторический контекст и современные технологии, позволяет эффективно преподавать физическую космологию и модифицированные теории гравитации, формируя у студентов глубокое понимание предмета и готовность к участию в передовых научных исследованиях.

В процессе преподавании темы по космологической инфляции в физической космологии в курсе физики рекомендуется использовать междисциплинарный подход в изучении физики, сочетать занятий нового знания с вычислительными практикумами, применять элементы программирования, анализировать реальные данные космической миссии Planck, организовывать исследовательские мини-проекты. Эффективным способом обучения является сочетание лекций и вычислительных практикумов. Студентам предлагается выводить уравнения движения, рассчитывать параметры медленного скатывания, определять спектральный индекс n_s, вычислять тензорно-скалярное отношение r, проводить численное моделирование. Использование компьютерных технологий позволяет перейти от пассивного усвоения материала к исследовательской деятельности. Современные образовательные технологии предполагают работу студентов с реальными научными данными. Особое значение имеют результаты проектов Planck, BICEP/Keck, LIGO/Virgo. Сравнение теоретических моделей с наблюдательными ограничениями способствует формированию навыков научного анализа.

Методика проведения практического занятия по сопоставлению модифицированных моделей $f\,(R)$-гравитации с космологическими данными обсерватории Planck строится на сочетании аналитического анализа модифицированных уравнений поля и численного моделирования спектров анизотропии космического микроволнового фона. Основной дидактической целью данного занятия семинара по сопоставлению модифицированных моделей $f\,(R)$-гравитации с космологическими данными астрофизических обсерваторий является формирование у обучающихся практических навыков проверки альтернативных теорий гравитации на соответствие прецизионным астрофизическим наблюдениям. Обучение организуется через последовательное прохождение теоретического, вычислительного и аналитического этапов, каждый из которых готовит обучающихся к самостоятельной исследовательской работе в области физической космологии. В начале занятия преподаватель организует краткий экскурс, посвящённый математическому аппарату $f\,(R)$-гравитации в различных системах отсчёта. Студенты рассматривают конкретные функциональные формы, такие как модель Старобинского или модель Ху-Савицкого, и выводят эффективный потенциал скалерона. Особое внимание уделяется тому, как геометрические поправки влияют на эволюцию масштабного фактора на инфляционной стадии и как они модифицируют уравнения для космологических возмущений. Этот этап позволяет заложить необходимый понятийный аппарат и связать чисто геометрические модификации действия Эйнштейна-Гильберта с динамикой ранней Вселенной. Основная практическая часть занятия посвящена работе со специализированным программным обеспечением для расчёта линейных возмущений, модифицированными для работы с теориями измененной гравитации. Обучающиеся учатся задавать параметры $f\,(R)$-моделей в качестве начальных условий для генерации теоретических спектров мощности скалярных и тензорных возмущений. В процессе симуляции обучающиеся наглядно наблюдают, как изменение параметров теории сдвигает положение акустических пиков и меняет амплитуду спектра на больших и малых

угловых масштабах по сравнению со стандартной космологической моделью. Заключительная фаза семинара включает в себя работу с марковскими цепями Монте-Карло посредством пакетов CosmoMC или Cobaya, интегрированных с официальными пакетами данных космической миссии Planck. Обучающиеся загружают экспериментальные данные по температурной анизотропии и линзированию реликтового излучения. Путём сопоставления теоретических предсказаний $f(R)$-моделей с эмпирическими картами космической миссии Planck, обучающиеся строят контуры доверительных интервалов на плоскости ключевых космологических параметров, включая спектральный индекс скалярных неоднородностей и тензорно-скалярное отношение. На основе полученных графиков обучающиеся делают обоснованный вывод о жизнеспособности рассматриваемой модификации гравитации и накладывают строгие ограничения на параметры свободных коэффициентов теории.

Заключение

Преподавание космологической инфляции в модифицированных теориях гравитации представляет собой эффективный инструмент интеграции фундаментальной науки и современного физического образования. Использование исследовательских методов обучения способствует развитию профессиональных компетенций будущих специалистов в области физики и астрономии. Космологическая инфляция является центральным элементом физической космологии. Модели Эйнштейна-Гаусса-Бонне позволяют расширить стандартное описание ранней Вселенной и служат удобным материалом для формирования исследовательских компетенций студентов педагогических университетов, обучающихся на специальностях с профилем по физике.

В ходе проведённого исследования была достигнута поставленная цель, то есть разработана методика преподавания космологической инфляции в контексте модифицированных теорий гравитации, адаптированная для студентов педагогических направлений подготовки со специализацией в области физики. Предложенный подход учитывает специфику будущей профессиональной деятельности слушателей, предполагающей не только владение предметным содержанием, но и способность транслировать сложные физические концепции в доступной форме, сочетая теоретический формализм с наглядной интерпретацией и опорой на наблюдательные астрофизические данные.

Анализ ключевых отличий инфляционных сценариев в рамках стандартной и модифицированной гравитации позволил выявить фундаментальные расхождения, обусловленные изменением структуры гравитационного взаимодействия. В частности, было показано, что введение дополнительных степеней свободы в модифицированных теориях существенно трансформирует динамику инфляционной стадии: изменяются уравнения движения скалярного поля, модифицируются условия медленного скатывания, а также перестраивается связь между параметрами потенциала инфлатона и наблюдаемыми космологическими величинами. Особое внимание уделено тому, как модификация уравнений Эйнштейна в рамках расширенных гравитационных теорий (например, $f(R)$-гравитации или скалярно-тензорных моделей) влияет на эволюцию метрических возмущений и формирование спектра первичных неоднородностей. Эти различия имеют принципиальное значение для понимания того, каким образом альтернативные теории гравитации могут быть эмпирически проверены, и должны быть отражены в учебном процессе через сравнительный анализ предсказаний различных моделей.

Созданные адаптированные учебные материалы, включающие решения упрощённых физических задач и визуализации динамики скалярного поля в неканонических моделях, продемонстрировали свою эффективность в снижении когнитивной нагрузки при освоении сложного математического аппарата. Упрощённые задачи, построенные на основе аналитических приближений и предельных случаев, позволяют студентам по-

этапно осваивать ключевые идеи, не теряя при этом связи с фундаментальными принципами. Визуализации, иллюстрирующие эволюцию масштабного фактора, поведение инфлатонного поля и формирование спектров возмущений в различных гравитационных моделях, способствуют формированию интуитивного понимания неинтуитивных космологических процессов. Практическое применение этих материалов в учебном процессе подтвердило их потенциал в развитии у студентов навыков интерпретации теоретических результатов и сопоставления их с наблюдательными астрофизическими данными.

Разработанный алгоритм оценки наблюдательных последствий для конкретных модификаций теории гравитации представляет собой методический инструмент, позволяющий систематизировать подход к анализу предсказательной силы альтернативных космологических моделей. Алгоритм включает последовательные этапы: формулировку полевых уравнений для выбранной модификации гравитации, вывод уравнений для метрических возмущений, расчёт спектральных индексов и отношения тензорных к скалярным модам, а также сравнение полученных результатов с современными наблюдательными ограничениями (например, данными спутника Planck). Применение этого алгоритма в рамках учебных занятий даёт студентам возможность не только освоить технические аспекты расчётов, но и понять, как теоретические модели подвергаются эмпирической проверке, а неопределённости в данных влияют на выбор допустимых сценариев инфляции. Таким образом, разработанная методика объединяет теоретический анализ, практическую работу с упрощёнными моделями и оценку наблюдательных следствий, формируя у студентов целостное представление о космологической инфляции в рамках как стандартной, так и модифицированной гравитации. Предложенные материалы могут быть интегрированы в учебные курсы по физической космологии для педагогических специальностей, способствуя повышению качества подготовки будущих учителей физики.

Гипотеза научного исследования, состоящая в том, что эффективное освоение студентами темы инфляции в модифицированных теориях гравитации возможно при использовании модульной системы обучения, сочетающей анализ классических решений с интерактивными моделями нестандартных гравитационных эффектов, подтверждена полностью.

Проведённое исследование демонстрирует существенный вклад в развитие дидактических подходов к преподаванию фундаментальных разделов теоретической физики, в частности — космологической инфляции в контексте модифицированных теорий гравитации. Теоретическая значимость работы обусловлена тем, что в ней обоснована возможность последовательной адаптации высокоабстрактных физических концепций — таких как динамика скалярного поля в неэйнштейновских гравитационных моделях или формирование первичных космологических возмущений — к образовательному процессу без утраты их научной строгости. При этом особое внимание уделено сохранению физической содержательности при упрощении математического аппарата: показано, каким образом ключевые особенности различных модификаций гравитации (включая $f(R)$ и $f(T)$ теории) могут быть раскрыты через систему логически связанных учебных задач и наглядных интерпретаций, позволяющих студентам проследить связь между структурой полевых уравнений и наблюдаемыми космологическими следствиями. Такой подход расширяет методологическую базу преподавания фундаментальной физики, предлагая инструментарий для трансляции сложных теоретических построений в академическую среду, ориентированную на подготовку педагогических кадров.

Практическая значимость исследования проявляется в возможности непосредственного внедрения разработанной методики в образовательный процесс педагогических университетов и институтов повышения квалификации работников образования. Предложенные учебные материалы и методические приёмы позволяют структурировать

изучение космологической инфляции как многоэтапный процесс, в котором освоение формализма отдельных гравитационных моделей сочетается с развитием навыков интерпретации наблюдательных данных и оценки предсказательной силы теоретических построений. Методика учитывает специфику профессиональной подготовки будущих учителей физики, делая акцент на формировании компетенций, необходимых для объяснения современных космологических концепций учащимся разных уровней, а также для организации учебно-исследовательской деятельности в рамках школьных и студенческих проектов. Её интеграция в учебные планы способствует повышению качества подготовки специалистов, способных не только ориентироваться в актуальных направлениях астрофизики и космологии, но и эффективно транслировать эти знания в образовательной среде, обеспечивая преемственность между передовыми научными исследованиями и школьным курсом физики.

Таким образом, сочетание теоретической обоснованности и практической применимости предложенной методики создаёт основу для совершенствования преподавания сложных разделов современной физики в системе педагогического образования, способствуя формированию у будущих преподавателей целостного представления о структуре и логике научного знания, а также развитию навыков адаптации этого знания к различным образовательным контекстам.

Включение тематики космологической инфляции и модифицированных теорий гравитации в образовательный процесс педагогического университета позволяет повысить мотивацию студентов, развить исследовательские компетенции, сформировать навыки математического моделирования астрофизических процессов, познакомить обучающихся с современными направлениями фундаментальной астрофизики. Преподавание космологической инфляции в модифицированных теориях гравитации способствует формированию исследовательских компетенций обучающихся, развитию навыков математического моделирования и повышению интереса к современной астрофизике.

Список использованных источников

1. Bamba Kazuharu, Odintsov Sergei. Inflationary cosmology in modified gravity theories // Symmetry. — 2015. — Mar. — Vol. 7, no. 1. — P. 220–240. — URL: http://dx.doi.org/10.3390/sym7010220.

2. Sebastiani Lorenzo, Myrzakulov Ratbay. F(R)-gravity and inflation // International journal of geometric methods in modern physics. — 2015. — Oct. — Vol. 12, no. 09. — P. 1530003. — URL: http://dx.doi.org/10.1142/s0219887815300032.

3. Cimdiker Ilim Irfan. Starobinsky inflation in emergent gravity // Physics of the Dark Universe. — 2020. — Dec. — Vol. 30. — P. 100736. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.dark.2020.100736.

4. Inflationary cosmology in f(R,T) modified gravity / E. H. Baffou [et al.] // Annals of Physics. — 2021. — Nov. — Vol. 434. — P. 168620. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.aop.2021.168620.

5. Bhat Aaqid, Mandal Sanjay, Sahoo P. K. Slow-roll inflation in $f\,(T, mathcalT)$ modified gravity // Chinese Physics C. — 2023. — Dec. — Vol. 47, no. 12. — P. 125104. — URL: http://dx.doi.org/10.1088/1674-1137/ad010f.

6. De Felice Antonio, Tsujikawa Shinji. Inflationary gravitational waves in the effective field theory of modified gravity // Physical Review D. — 2015. — May. — Vol. 91, no. 10. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/physrevd.91.103506.

7. Myrzakul Shynaray, Myrzakulov Ratbay, Sebastiani Lorenzo. Chaotic inflation in higher derivative gravity theories // The European physical journal C. — 2015. — Mar. — Vol. 75, no. 3. — URL: http://dx.doi.org/10.1140/epjc/s10052-015-3332-x.

8. Gannouji Radouane. A primer on modified gravity // International journal of modern physics D. — 2019. — Apr. — Vol. 28, no. 05. — P. 1942004. — URL: http://dx.doi.org/10.1142/s0218271819420045.

9. Modified gravity and cosmology / Timothy Clifton [et al.] // Physics reports. — 2012. — Mar. — Vol. 513, no. 1-3. — P. 1–189. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.physrep.2012.01.001.

10. Herrmann Friedrich, Pohlig Michael. Gravitoelectromagnetism: L'art pour L'art-or a subject for the classroom // The 1st electronic conference on Universe. — ECU 2021. — MDPI, 2021. — Feb. — P. 56. — URL: http://dx.doi.org/10.3390/ECU2021-09282.

11. Kinchin Ian M., Mollits Aet, Reiska Priit. Uncovering types of knowledge in concept maps // Education sciences. — 2019. — June. — Vol. 9, no. 2. — P. 131. — URL: http://dx.doi.org/10.3390/educsci9020131.

12. Kaganovich Alexander B. Two-measure electroweak standard model and its realization during cosmological evolution // Symmetry. — 2026. — Mar. — Vol. 18, no. 3. — P. 508. — URL: http://dx.doi.org/10.3390/sym18030508.

13. da Cruz Claudio, de Faria Antonio. Deformed special relativity in light of the Unruh effect // Symmetry. — 2026. — Mar. — Vol. 18, no. 3. — P. 464. — URL: http://dx.doi.org/10.3390/sym18030464.

14. Nojiri Shin'ichi, Odintsov Sergei D., Paul Tanmoy. Different aspects of entropic cosmology // Universe. — 2024. — Sept. — Vol. 10, no. 9. — P. 352. — URL: http://dx.doi.org/10.3390/universe10090352.

15. Saha Dalia, Chakrabortty Manas, Sanyal Abhik. Reconstructing modified and alternative theories of gravity // Universe. — 2024. — Jan. — Vol. 10, no. 1. — P. 44. — URL: http://dx.doi.org/10.3390/universe10010044.

16. Ketov Sergei V. Starobinsky-Bel-Robinson gravity // Universe. — 2022. — June. — Vol. 8, no. 7. — P. 351. — URL: http://dx.doi.org/10.3390/universe8070351.

17. Mughal Muhammad Zahid, Ahmad Iftikhar, García Guirao Juan Luis. Relativistic cosmology with an introduction to inflation // Universe. — 2021. — July. — Vol. 7, no. 8. — P. 276. — URL: http://dx.doi.org/10.3390/universe7080276.

Сведения об авторах:

Максим Андреевич Чернеев — студент очной магистратуры факультета физико-математического и технологического образования ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», Ульяновск, Россия.

E-mail: makcn777@gmail.com

ORCID iD 0009-0001-5846-134X

Web of Science ResearcherID JRW-5638-2023

Original article
PACS 01.40.Di
OCIS 000.2060
MSC 83D05

Methods of teaching cosmological inflation in modified theories of gravity in a physics course

M. A. Cherneev

Ulyanovsk State Pedagogical University, 432071, Ulyanovsk, Russia

Submitted May 14, 2026
Resubmitted May 16, 2026
Published June 30, 2026

Abstract. The discussed methodology for teaching cosmological inflation in modified theories of gravity can become an innovative basis for training physics teachers who teach both undergraduate and school students in specialized courses. The use of hybrid approaches (for example, a combination of general relativity and $f(R)$ theories of gravity) helps develop flexible thinking in future teachers, emphasizing alternative theories of gravity. This develops a critical attitude toward standard models and stimulates scientific curiosity in students. The methodology integrates interdisciplinary connections, linking physical cosmology with mathematical analysis, the history of science (for example, the evolution of ideas from Einstein to Starobinsky), and problems of fine-tuning the Universe, which meets modern requirements for a competency-based approach in pedagogical education. Methodological approaches to teaching physical cosmology are considered using inflationary models in modified theories of gravity as an example. Particular attention is given to the Einstein–Gauss–Bonnet theory, which allows us to connect fundamental questions about the early Universe with modern observational data. A course structure is proposed that focuses on developing the research competencies of students majoring in pedagogy and physics. Furthermore, situational problems comparing the predictions of various theories (e.g., from $f(R)$ to ΛCDM) can be used in practical exercises where students develop physics lessons for high school students, learning methods for activating cognitive activity. Finally, this methodology contributes to the motivation of students in pedagogical universities due to the relevance of the topic: a discussion of inflation in modified theories of gravity draws attention to the cutting-edge areas of modern astrophysics, which is especially important for the development of the professional identity of future physics teachers.

Keywords: cosmology, inflation, modified gravity, Einstein–Gauss–Bonnet theory, physics teaching methods, higher education

References

1. Bamba Kazuharu, Odintsov Sergei. Inflationary cosmology in modified gravity theories // Symmetry. — 2015. — Mar. — Vol. 7, no. 1. — P. 220–240. — URL: http://dx.doi.org/10.3390/sym7010220.

2. Inflationary cosmology in f(R,T) modified gravity / E. H. Baffou [et al.] // Annals of Physics. — 2021. — Nov. — Vol. 434. — P. 168620. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.aop.2021.168620.

3. Bhat Aaqid, Mandal Sanjay, Sahoo P. K. Slow-roll inflation in $f\,(T, mathcalT)$ modified gravity // Chinese Physics C. — 2023. — Dec. — Vol. 47, no. 12. — P. 125104. — URL: http://dx.doi.org/10.1088/1674-1137/ad010f.

4. Gannouji Radouane. A primer on modified gravity // International journal of modern physics D. — 2019. — Apr. — Vol. 28, no. 05. — P. 1942004. — URL: http://dx.doi.org/10.1142/s0218271819420045.

5. Modified gravity and cosmology / Timothy Clifton [et al.] // Physics reports. — 2012. — Mar. — Vol. 513, no. 1-3. — P. 1–189. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.physrep.2012.01.001.

6. De Felice Antonio, Tsujikawa Shinji. Inflationary gravitational waves in the effective field theory of modified gravity // Physical Review D. — 2015. — May. — Vol. 91, no. 10. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/physrevd.91.103506.

7. Sebastiani Lorenzo, Myrzakulov Ratbay. F(R)-gravity and inflation // International journal of geometric methods in modern physics. — 2015. — Oct. — Vol. 12, no. 09. — P. 1530003. — URL: http://dx.doi.org/10.1142/s0219887815300032.

8. Cimdiker Ilim Irfan. Starobinsky inflation in emergent gravity // Physics of the Dark Universe. — 2020. — Dec. — Vol. 30. — P. 100736. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.dark.2020.100736.

9. Myrzakul Shynaray, Myrzakulov Ratbay, Sebastiani Lorenzo. Chaotic inflation in higher derivative gravity theories // The European physical journal C. — 2015. — Mar. — Vol. 75, no. 3. — URL: http://dx.doi.org/10.1140/epjc/s10052-015-3332-x.

10. Herrmann Friedrich, Pohlig Michael. Gravitoelectromagnetism: L'art pour L'art-or a subject for the classroom // The 1st electronic conference on Universe. — ECU 2021. — MDPI, 2021. — Feb. — P. 56. — URL: http://dx.doi.org/10.3390/ECU2021-09282.

11. Kinchin Ian M., Mollits Aet, Reiska Priit. Uncovering types of knowledge in concept maps // Education sciences. — 2019. — June. — Vol. 9, no. 2. — P. 131. — URL: http://dx.doi.org/10.3390/educsci9020131.

12. Kaganovich Alexander B. Two-measure electroweak standard model and its realization during cosmological evolution // Symmetry. — 2026. — Mar. — Vol. 18, no. 3. — P. 508. — URL: http://dx.doi.org/10.3390/sym18030508.

13. da Cruz Claudio, de Faria Antonio. Deformed special relativity in light of the Unruh effect // Symmetry. — 2026. — Mar. — Vol. 18, no. 3. — P. 464. — URL: http://dx.doi.org/10.3390/sym18030464.

14. Nojiri Shin'ichi, Odintsov Sergei D., Paul Tanmoy. Different aspects of entropic cosmology // Universe. — 2024. — Sept. — Vol. 10, no. 9. — P. 352. — URL: http://dx.doi.org/10.3390/universe10090352.

15. Saha Dalia, Chakrabortty Manas, Sanyal Abhik. Reconstructing modified and alternative theories of gravity // Universe. — 2024. — Jan. — Vol. 10, no. 1. — P. 44. — URL: http://dx.doi.org/10.3390/universe10010044.

16. Ketov Sergei V. Starobinsky-Bel-Robinson gravity // Universe. — 2022. — June. — Vol. 8, no. 7. — P. 351. — URL: http://dx.doi.org/10.3390/universe8070351.

17. Mughal Muhammad Zahid, Ahmad Iftikhar, García Guirao Juan Luis. Relativistic cosmology with an introduction to inflation // Universe. — 2021. — July. — Vol. 7, no. 8. — P. 276. — URL: http://dx.doi.org/10.3390/universe7080276.

Information about authors:

Maxim Andreevich Cherneev — master's student of the Faculty of Physics, Mathematics and Technological Education of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Ulyanovsk State Pedagogical University", Ulyanovsk, Russia.

E-mail: makcn777@gmail.com

ORCID iD 0009-0001-5846-134X

Web of Science ResearcherID JRW-5638-2023

Авторский указатель

Алтунин, К. К., 1
Чернеев, М. А., 124
Криворотова, Н. В., 59
Павлова, Е. С., 71
Родионова, А. А., 92
Селюкова, А. Д., 109
Толянина, З. А., 1

Author's index

Altunin, K. K., 1

Cherneev, M. A., 124

Krivorotova, N. V., 59

Pavlova, E. S., 71

Rodionova, A. A., 92

Selyukova, A. D., 109

Tolyanina, Z. A, 1