Секция 2

Науки об образовании

2.1 Теория и методика обучения и воспитания

Научная статья
УДК 372.853
ББК 74.48
ГРНТИ 14.35.09
ВАК 5.8.2.
PACS 01.40.Di
OCIS 000.20600
MSC 00A79

Разработка курса по компьютерному моделированию квантовых систем пониженной размерности в системе управления обучением MOODLE

Е. А. Илюшкина [1]

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ульяновский государственный педагогический университет имени И. Н. Ульянова», 432000, Ульяновск, Россия

Поступила в редакцию 15 июля 2026 года
После переработки 17 июля 2026 года
Опубликована 30 сентября 2026 года

Аннотация. Представлены результаты разработка дистанционного курса по компьютерному моделированию квантовых систем пониженной размерности в системе управления обучением MOODLE. Описаны результаты разработки тематической структуры и учебных материалов дистанционного курса по компьютерному моделированию квантовых систем пониженной размерности в системе управления обучением MOODLE.

Ключевые слова: курс, дистанционный курс, компьютерное моделирование, система пониженной размерности

[1]E-mail: elenailuskina2004@gmail.com

Введение

Разработка курса по компьютерному моделированию квантовых систем пониженной размерности в интегрированной системе управления обучением MOODLE становится особенно актуальной в условиях цифровизации высшего образования и формирования междисциплинарной компетенции, необходимой для решения задач нанотехнологий и квантовых технологий, где моделирование становится ключевым навыком для подготовки специалистов в области нанотехнологий, оптоэлектроники и квантовых технологий, требующих глубокого понимания как теоретических основ, так и практических инструментов программной реализации. Использование системы управления обучением MOODLE в качестве платформы для дистанционного курса позволяет преодолеть географические и временные барьеры, обеспечивая студентам и исследователям из разных регионов возможность изучать сложные методы моделирования и квантово-химические пакеты в удобном темпе, что особенно важно для формирования компетенций в условиях дефицита специализированных очных лабораторий. Курс отвечает потребностям в гибком и доступном обучении специалистов, способных применять методы численного моделирования для анализа и проектирования структур с заданными электрооптическими, магнитными и транспортными свойствами, сокращая тем самым зависимости от дорогостоящих лабораторных стендов и очного взаимодействия. Особое внимание уделяется многофизическому моделированию, объединяющему электростатику, теплопроводность, спин-динамику и нелинейные оптические эффекты, что критично для проектирования лазеров, солнечных элементов, спинтронных устройств и квантовых компьютеров. Методы включают как аналитические решения (матричный метод передачи электромагнитных волн для оптики, теория возмущений для электрооптических эффектов) так и численные алгоритмы (метод конечных элементов, методы Монте-Карло, метод неравновесной матрицы плотности), позволяющие учитывать дефекты, дислокации и взаимодействие с фононами или фотонами. Эта область активно развивается на стыке физики, материаловедения и информационных технологий, обеспечивая виртуальное прототипирование наноустройств до их физической реализации и ускоряя открытия в таких приоритетных направлениях, как квантовые технологии, гибкая электроника и нейроморфные системы. Актуальность темы также связана с ростом интереса к квантовым материалам (графен, перовскиты, наноструктурированные полупроводники) и необходимостью подготовки кадров, владеющих как теоретическими основами, так и практическими навыками работы с программными комплексами (Lumerical, COMSOL) и Python-библиотеками, что напрямую влияет на инновационное развитие отрасли. Актуальность курса обусловлена необходимостью сочетания теоретического обучения (например, анализ формул для поляритонов, электрооптических эффектов) с практическим освоением специализированных программных пакетов (Lumerical, COMSOL) и Python-библиотек, что позволяет студентам не только воспроизводить научные результаты, но и разрабатывать собственные модели для решения прикладных задач в области оптоэлектроники и квантовой инженерии.

Компьютерное моделирование квантово-размерных систем представляет собой междисциплинарное направление, сочетающее квантовую механику, вычислительную физику и материаловедение для изучения наноструктур, размеры которых сравнимы с длиной волны де Бройля для электронов. Основными объектами исследования выступают квантовые точки, нанопроволоки, двумерные материалы (графен, дихалькогениды переходных металлов) и гетероструктуры, в которых проявляются уникальные эффекты: размерное квантование, кулоновская блокада, спин-орбитальное взаимодействие и экситон-биэкситонная динамика. Методы моделирования варьируются от подходов на основе функционала матрицы плотности до полуэмпирических (модель эффективной массы, $\mathbf{k} \cdot \mathbf{p}$-теория) и классических уравнений (уравнения Максвелла для

оптики, транспортные модели). Актуальность направления определяется его вкладом в разработку оптоэлектроники, квантовых вычислений, спинтроники и фотоники, где моделирование позволяет предсказывать свойства материалов до их синтеза, оптимизировать параметры устройств и сокращать затраты на экспериментальные исследования. Современные вычислительные платформы интегрируют параллельные алгоритмы, машинное обучение для ускоренного скрининга материалов и гибридные модели, сочетая атомистические и феноменологические подходы для решения масштабируемых задач в наноэлектронике.

Рассматриваются результаты разработки дистанционного курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем в виде дистанционного курса, созданного в системе управления обучением MOODLE. Дистанционный курс по компьютерному моделированию квантово-размерных систем посвящён изучению методов компьютерного моделирования квантово-размерных систем. Проведено описание основных функциональных возможностей дистанционного курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем, созданного в системе управления обучением MOODLE на образовательном портале университета. Обсуждаются возможности модульной структуры дистанционного курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем.

Курс по компьютерному моделированию квантово-размерных систем посвящён изучению фундаментальных идей физики квантово-размерных систем. В работе рассматриваются методические особенности процесса разработки дистанционного курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем в системе управления обучением MOODLE, который может быть использован в вузовском курсе физики.

Целью работы является описание процесса разработки дистанционного курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем. Задача исследования состоит в разработке модульной структуры и заданий дистанционного курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем в системе управления обучением MOODLE. Объектом исследования является курс по компьютерному моделированию квантово-размерных систем. Предметом исследования является процесс создания информационных и контролирующих элементов дистанционного курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем в системе управления обучением MOODLE.

Гипотеза научного исследования состоит в том, что если использовать курс по компьютерному моделированию квантово-размерных систем, основанный на комбинации теоретических методов и численных методов в процессе изучения квантовой физики квантово-размерных систем, то можно повысить познавательный интерес студентов к физике квантово-размерных систем.

Обзор работ по моделированию квантово-размерных систем

Область моделирования квантово-размерных систем охватывает численные методы исследования наноструктур — таких как квантовые точки, ямы, проволоки и слоистые гетероструктуры, в которых квантовые эффекты (например, размерное квантование, туннелирование, взаимодействия экситонов и поляритонов) определяют их уникальные оптоэлектронные, магнитные и транспортные свойства. В основе моделирования лежат квантовые уравнения (уравнение Шрёдингера, метод функционала плотности, $\mathbf{k} \cdot \mathbf{p}$-теория) и классические подходы (уравнения Максвелла для оптических свойств, уравнения Больцмана для переноса заряда), интегрируемые с помощью специализированных программных пакетов.

Квантово-размерные системы пониженной размерности, включая квантовые ямы с двухмерном ограничением пространства, квантовые проволоки с одномерном огра-

ничением пространства и квантовые точки с нуль-мерном ограничением пространства, демонстрируют дискретные энергетические спектры из-за квантового ограничения. Моделирование этих систем требует сопоставления атомистических деталей с макроскопической физикой устройств. Разработана иерархия теоретических подходов, каждый из которых имеет компромисс между точностью, вычислительными затратами и физической прозрачностью.

Самым простым и наиболее исторически влиятельным подходом является приближение эффективной массы. Приближение эффективной массы рассматривает электроны и дырки как свободные частицы с эффективной массой $m^{\pm}$, ограниченные потенциальной ямой. В своей самой простой форме уравнение Шрёдингера для одной зоны решается внутри и вне наноструктуры. Хотя оно быстрое и интуитивно понятное, приближение эффективной массы имеет известные ограничения, то есть оно справедливо только вблизи краёв зон и для малых энергий ограничения. Приближение эффективной массы переоценивает энергии ограничения в малых квантовых точках, поскольку реальные зоны отклоняются от параболичности при больших k-векторах [1]. Модификация квадратной ямы конечной глубины значительно улучшает предсказания приближение эффективной среды, обеспечивая хорошее соответствие экспериментальным данным для квантовых точек и квантовых проволок II–VI и III–V в широком диапазоне размеров, при условии, что зоны почти параболические [2]. Для полупроводников с узкой запрещённой зоной (например, PbS, PbSe, InAs) приближение эффективной среды с конечной ямой не работает из-за сильной непараболичности, и становятся необходимыми многозонные или гиперболические зонные модели [2].

В статье [3] показано, что $\mathbf{k} \cdot \mathbf{p}$-метод обобщает приближения эффективной среды путём связи нескольких зон в рамках огибающей функции. Наиболее широко используемыми вариантами являются модели 6×6 (валентные полосы, включая полосы тяжелых дырок, лёгких дырок и расщеплённые полосы) и 8×8 (добавление полосы проводимости). Знаковое сравнение, проведённое Фу, Вангом и Зунгером [3], показало, что стандартный подход 6×6 $\mathbf{k} \cdot \mathbf{p}$ значительно переоценивает энергии локализации как электронов, так и дырок в квантовых точках InP по сравнению с прямой псевдопотенциальной диагонализацией. Кроме того, для материалов с малым спин-орбитальным взаимодействием $\mathbf{k} \cdot \mathbf{p}$ предсказывает неверный порядок валентных состояний (p-подобные выше s-подобных) [3]. Ошибки были связаны с неточным описанием дисперсии объёмных зон в приближении $\mathbf{k} \cdot \mathbf{p}$ вдали от точки Г, особенно для полос лёгких дырок и проводимости.

Систематический вывод уравнений эффективной массы для 8-зонной $\mathbf{k} \cdot \mathbf{p}$ в зоне проводимости, выполненный Миелником-Пыщорским и др. [4], показал, что количественно точное уравнение эффективной массы для самоорганизующихся квантовых точек требует: самосогласованной перенормировки параметров $\mathbf{k} \cdot \mathbf{p}$, включения поправок на непараболичность посредством средних членов $< k^2 >$ и охранения полной матричной структуры валентной зоны. Даже в этом случае ошибка расщепления $s - p$-оболочки может составлять $\approx 30\,\%$ для однородных квантовых точек InAs/GaAs, хотя согласие улучшается для гладких профилей состава [4]. Интересно, что электронный g-фактор можно достаточно хорошо оценить, используя простую полуфеноменологическую формулу Рота-Лакса-Цвердлинга [4].

Для деформированных квантовых точек InAs/GaAs эффективный подход с одной подзоной, зависящей от энергии эффективной массой и дополнительным отталкивающим потенциалом, имитирующим деформацию и пьезоэлектрические эффекты, успешно воспроизводит как расчёты, так и экспериментальные данные зависимости ёмкости от напряжения [5].

Метод сильной связи предлагает атомистическое описание квантовых систем путём построения волновых функций как линейных комбинаций атомоподобных орбиталей.

Модель эффективных связывающих орбиталей [6] заменяет структуру цинковой обманки эффективной гранецентрированной кубической решёткой, используя лишь несколько орбиталей на узел. Ключевые результаты исследований метода сильной связи включают: для квантовых точек GaAs приближения эффективной среды качественно воспроизводит структуру уровней (группировка уровней, пространственная зависимость волновых функций), но количественно переоценивает энергии ограничения для диаметров менее ≈ 40 Åиз-за непараболичности [6]. Для точек CdS параметризация метода сильной связи, подгоняющая объёмную зонную структуру по всей зоне Бриллюэна, даёт хорошее соответствие экспериментальным данным оптического поглощения после включения кулоновских поправок [6]. Волновые функции метода сильной связи точно соответствуют огибающим функциям приближения эффективной среды по форме, но конечная амплитуда на границе кристаллитов подразумевает необходимость конечных (а не бесконечных) потенциалов ограничения (≈ 10 эВ) [6].

Метод эмпирических псевдопотенциалов решает уравнение Шрёдингера для одной частицы напрямую, используя экранированные нелокальные псевдопотенциалы для каждого типа атомов без обращения к эффективным массам. Для квантовых точек из $\approx 10^3$ атомов метод свёрнутого спектра позволяет получить точные собственные решения вблизи краёв зон с помощью линейных вычислений с учётом масштабирования [3]. Метод эмпирических псевдопотенциалов был применён к квантовым точкам Si, CdSe, GaAs и InP, что позволило получить ширины запрещённых зон в отличном согласии с экспериментом. Его ключевое преимущество заключается в том, что не требуются приближения эффективной массы или параметры подгонки, выходящие за рамки объёмных псевдопотенциалов [3].

Усовершенствованный нормализованный метод плоских волн с использованием рядов Фурье-синусов (вместо периодических граничных условий) значительно снижает вычислительные затраты для расчетов $\mathbf{k}\cdot\mathbf{p}$ квантовых точек [7]. Для квантовых точек Si была разработана методика коррекции размера для согласования $\mathbf{k}\cdot\mathbf{p}$ с результатами сильной связи: для точек диаметром менее ≈ 2 нм диаметр $\mathbf{k}\cdot\mathbf{p}$ должен быть увеличен более чем на 30 % для соответствия основному состоянию дырки сильной связи, учитывая делокализацию волновой функции на пассивирующие атомы водорода [7].

Для квазиодномерных наноструктур (квантовых проводов и сильно вытянутых квантовых точек) была выведена аналитическая формула в реальном пространстве для эффективного потенциала электрон-электронного взаимодействия путём усреднения трёхмерного кулоновского потенциала по поперечным степеням свободы [8]. Этот потенциал мягче, чем чистый кулоновский потенциал на малых расстояниях, имеет пик при нулевом расстоянии и не содержит параметров подгонки. Он точно воспроизводит полные трёхмерные результаты для образования молекул Вигнера в связанных квантовых точках и энергии связывания экситонов в квантовых проволоках [8].

Когда квантовая точка внедрена в матрицу с диэлектрическим несоответствием, заряды поверхностной поляризации изменяют как потенциал одной частицы (самополяризация), так и электрон-электронное взаимодействие. Вычислительно осуществимая модель в рамках приближения локальной спиновой плотности обрабатывает индуцированные заряды [9]. Для вытянутых наностержней CdSe в изолирующей среде диэлектрическое ограничение смещает плотность электронов к концам стержня, не изменяя лежащую в основе корреляционную фазу (волна плотности заряда против волны плотности спина), за исключением фазовых переходов, где оно может инвертировать порядок стабильности [9].

Гибридный гамильтониан размерностей, интерполирующий между одномерным и двумерным движением, моделирует квантовый провод на поверхности, где частицы имеют разные эффективные массы для движения вдоль провода и вдоль поверхности

[10]. Запаздывающая функция Грина приобретает дополнительные экспоненциальные члены из-за провода, и влияние провода на рассеяние на примесях экспоненциально подавляется, если примесь или точка наблюдения находятся далеко от провода. Эффект наиболее выражен, когда эффективная масса вдоль провода намного меньше, чем на поверхности (например, нанопровод InSb на Si) [10].

Новые квантовые теории встраивания, включая квантовую теорию встраивания функционала плотности, теорию встраивания матрицы плотности и методы, основанные на функциях Грина, разделяют систему на активную область, обрабатываемую с высокой точностью, и среду, обрабатываемую с меньшими затратами [11]. Эти подходы перспективны для моделирования сильно коррелированных спиновых дефектов (например, NV^- в алмазе, дивакансия в SiC) на зашумлённых квантовых компьютерах промежуточного масштаба. Расчёты на квантовом оборудовании (сверхпроводящие кубиты IBM, ионные ловушки) с использованием 2 или 4 кубитов продемонстрировали осуществимость, хотя аппаратный шум остаётся проблемой [11].

Относительно простая схема вычисляет собственные значения ограниченных блоховских волн в низкоразмерных системах, используя преобразование Фурье ограниченных стоячих волн в качестве коэффициентов разложения для блоховских состояний [1, 12]. Этот подход, который интегрирует по дисперсионному соотношению объёма, а не диагонализирует большие гамильтонианные матрицы, улучшает приближение эффективной среды, используя полную объёмную зонную структуру, а не только её кривизну. Этот подход был успешно применён к кубическим квантовым точкам GaAs, предсказывая переход от $\Gamma_{1,c}$ к $X_{1,c}$ при критическом размере ≈ 41 Å [1].

Результаты разработки структуры дистанционного курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем

Курс по компьютерному моделированию квантово-размерных систем и структур пониженной размерности предназначен для студентов, интересующихся передовыми направлениями квантовой физики систем пониженной размерности. Курс сочетает теоретическое обоснование физических концепций, практическое применение численных методов и мультифизических моделей, а также анализ актуальных технологических решений в области физики и технологии квантовых систем пониженной размерности. Общая трудоёмкость курса составляет 180 академических часов, что соответствует 5 зачётным единицам и распределяется равномерно по модулям для обеспечения глубокого и систематического усвоения теоретического материала.

Процесс разработки дистанционного курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем в системе управления обучением MOODLE начинается с анализа образовательных потребностей и требований к компетенциям выпускников, определяя акцент на практическую применимость знаний в сфере нанотехнологий и квантовых вычислений. На следующем этапе проводится структурирование учебного материала с учётом логики построения курса, где теоретические основы квантовой механики и численного моделирования (темы 2 и 3) предваряют изучение конкретных наноструктур (темы 5-13), обеспечивая постепенное усложнение задач от квантовых ям до молекулярных систем. Особое внимание уделяется интеграции практических занятий, где студенты освоят языки программирования Python и Octave как основные инструменты для реализации численных методов, таких как методы конечных разностей, квантово-химические расчёты (метод матрицы плотности в библиотеке PySCF) и моделирование транспортных свойств квантово-размерных систем с использованием пакетов QuTiP или MEEP. Подготовка мультимедийных материалов, включая анимации процессов квантования, интерактивные симуляции в Jupyter Notebook и лекции с демонстрацией кода, позволяет обеспечить доступность сложного материала для дистанционного

обучения, а модульная система контроля с промежуточными тестами и проектными задачами формирует мотивацию и фиксирует прогресс. Организация групповых проектов по моделированию конкретных наноструктур (например, квантовых точек или графеновых гетероструктур) с последующей защитой в виде репозиториев на GitHub или презентаций в системе управления обучением MOODLE активизирует практическое применение знаний, а экспертная оценка работ способствует формированию критического мышления. На этапе настройки системы управления обучением MOODLE разрабатываются автоматизированные системы обратной связи, включая проверку кода на корректность и соответствие заданию, а также форумы для обсуждения теоретических и технических вопросов, что создаёт сообщество учащихся и поддерживает академическую дискуссию. Для обеспечения гибкости курса внедряется адаптивная система оценки, учитывающая как теоретические знания, так и умение решать прикладные задачи, с возможностью доработки проектов на основе обратной связи от преподавателей. Техническая поддержка и обучение студентов работе с платформой через краткие руководства по системе управления обучением MOODLE и инструментам версиирования кода минимизирует барьеры при переходе на дистанционную форму обучения. На заключительном этапе проводится оптимизация содержания курса на основе анализа статистики успешности выполнения заданий и отзывов студентов, что позволяет корректировать сложность материалов, уделять больше времени проблемным темам и вводить новые актуальные примеры, например, связанные с фотонными материалами или наноструктурами для квантовых компьютеров. Внедрение системы взаимной оценки проектов стимулирует командную работу, а интеграция с внешними ресурсами, такими как базы данных материалов или вычислительные кластеры, расширяет возможности для глубокого погружения в прикладные аспекты моделирования. Завершающим шагом становится сертификация курса и разработка методических рекомендаций, которые позволят другим высшим учебным заведениям адаптировать его для своих нужд, обеспечивая масштабируемость и воспроизводимость образовательного продукта в области квантового моделирования.

Первая тема дистанционного курса посвящена изучению особенностей низкоразмерных систем и элементарных наноструктур из системы квантовых ям, нитей, точек и полупроводниковых. Вторая тема дистанционного курса посвящена изучению методов квантовой механики для моделирования квантово-размерных систем. Третья тема дистанционного курса посвящена изучению численных методов в моделировании квантово-размерных систем. Четвёртая тема дистанционного курса посвящена изучению программного обеспечения и инструментов для моделирования систем пониженной размерности. Пятая тема посвящена изучению моделирования низкоразмерных систем из наночастиц и кластеров. Шестая тема посвящена изучению моделирования квантовых точек и проволок. Седьмая тема дистанционного курса посвящена изучению электронных и транспортных свойств квантово-размерных систем. Восьмая тема дистанционного курса посвящена изучению двумерного электронного газа в структурах металл–диэлектрик–полупроводник. Девятая тема посвящена изучению квантового эффекта Холла в двумерном электронном газе. Десятая тема посвящена изучению транспортных явлений в наноструктурах из квантово-размерных систем. Одиннадцатая тема посвящена изучению туннелирования через квантово-размерные структуры. Двенадцатая тема дистанционного курса посвящена изучению моделирования оптических и магнитных свойств наноструктур на основе квантово-размерных систем. Тринадцатая тема посвящена изучению моделирования структур одноэлектроники. Четырнадцатая тема посвящена изучению статистической физики и термодинамики квантово-размерных систем. Пятнадцатая тема дистанционного курса посвящена изучению моделирования молекулярных систем.

На первом этапе необходимо провести анализ образовательных потребностей и целевой аудитории, чтобы определить уровень подготовки студентов и их профессиональные ориентиры. Это позволит скорректировать глубину изложения материала и включить в курс актуальные задачи, востребованные в современной наноинженерии и фотонике. Особое внимание следует уделить изучению специфики дистанционного обучения, так как студенты, возможно, будут иметь разные уровни технической подготовки, включая владение программным обеспечением и численными методами.

Далее требуется определение образовательных целей и компетенций курса, которые должен освоить обучающийся по завершении курса. В данном случае ключевыми станут умение моделировать квантово-размерные системы с использованием современных программных инструментов, анализировать результаты численного моделирования, а также применить полученные знания для решения практических задач в области наноэлектроники и фотоники. Этот этап предполагает формулировку конкретных компетенций, таких как работа с квантово-механическими уравнениями, интерпретация спектров электронных состояний и оптимизация параметров наноструктур.

Следующим шагом становится структурирование тематического плана с учётом логики учебного процесса, где каждая тема должна органично переходить к следующей. Например, после изучения основ квантовой механики (тема 2) необходимо ввести численные методы (тема 3), чтобы студенты могли практически применять теоретические знания. Важно соблюдать баланс между теоретическими и практическими разделами, чтобы избежать перегрузки студента и обеспечить постепенное усложнение материала. При этом темы, связанные с программным обеспечением (тема 4), должны предварять практику моделирования (темы 5–15), чтобы студенты могли сразу приступить к работе с инструментами.

Одним из ключевых этапов является разработка методического обеспечения курса, включающего учебные материалы, интерактивные симуляции и задания для самостоятельной работы. В контексте дистанционного формата особое значение приобретают мультимедийные ресурсы: видеолекции с объяснением сложных концепций, интерактивные модули для визуализации электронных состояний в наноструктурах, а также шаблоны кода для моделирования на различных платформах (например, COMSOL, Python, Octave). Также необходимо предусмотреть подробные руководства по установке и настройке программного обеспечения, чтобы минимизировать технические трудности студентов.

На следующем этапе требуется проектирование системы оценки знаний и навыков, которая будет объективно отражать уровень подготовки студентов. В данном курсе целесообразно сочетать традиционные формы контроля (тесты на теорию, домашние задания по численным расчётам) с более сложными формами проверки, такими как анализ результатов моделирования и защита проектов по оптимизации наноструктур. Автоматизированная проверка кода через специальные платформы (например, Moodle Assignment с загрузкой файлов) позволит экономить время преподавателя и повысить объективность оценок. Параллельно должна быть организована экспертная оценка проектных работ, где студенты разрабатывают модели реальных наносистем. Важным моментом является организация интерактивного взаимодействия, так как в дистанционном формате мотивация и вовлечённость студентов могут снижаться. Для этого необходимо создать форумы для обсуждения теоретических вопросов, вебинары по разбору практических задач и групповую работу над проектами. Например, студенты могут разрабатывать модели квантовых точек (тема 6) в командах, обмениваясь промежуточными результатами и получая обратную связь от преподавателя. Также полезно внедрить систему взаимной оценки, чтобы стимулировать активное участие в обсуждениях и улучшению качества работ.

Далее следует разработка разнообразных практических и проектных заданий по компьютерному моделированию квантово-размерных систем, которые обеспечат прикладную направленность обучения. Задания должны быть разнообразными и постепенно усложняться: от простых расчётов электронных спектров (темы 1–3) до комплексных проектов по моделированию транспортных свойств наноструктур (темы 10–11) или оптимизации параметров одноэлектронных устройств (тема 13). Например, студенты могут смоделировать квантовый эффект Холла (тема 9) и сравнить результаты с экспериментальными данными, что поможет закрепить понимание теории и практических навыков. Проектные работы должны быть ориентированы на решение реальных задач, например, разработку модели нанофотонного детектора на основе квантовых точек.

Обязательным этапом является техническое сопровождение курса в системе управления обучением MOODLE, включающее настройку платформы для поддержки интерактивных элементов. На платформе должны быть созданы разделы для каждой темы с размещёнными материалами, форумами, ссылками на внешние ресурсы (например, научные статьи или лекции) и системами автоматизированной проверки. Также необходимо предусмотреть интеграцию с внешними инструментами, такими как Jupyter Notebook для выполнения численных расчётов или GitHub для хранения проектов студентов. Важным аспектом является обеспечение доступа к вычислительным ресурсам, так как моделирование наноструктур требует значительных вычислительных мощностей.

На очередном этапе необходимо пилотное тестирование курса с последующим анализом обратной связи. Это позволит выявить слабые места в методическом обеспечении, трудности, с которыми столкнулись студенты, и корректировать курс перед полноценным запуском. Особое внимание следует уделить трудностям, связанным с освоением программного обеспечения или пониманием физических концепций. Обратная связь от студентов поможет оптимизировать структуру курса, уточнить формулировки заданий и скорректировать объём материала для лучшего усвоения.

Заключительным, но не менее важным, этапом является доработка и финальная адаптация курса под конкретные условия реализации. На основе результатов пилотирования могут быть внесены изменения в тематическое планирование, улучшена наглядность презентаций, добавлены дополнительные материалы для слабо подготовленных студентов или углублённые задания для сильных обучающихся. Также необходимо провести обучение преподавателей и технических специалистов, которые будут сопровождать курс, чтобы они могли оперативно решать возникающие вопросы. Важно, чтобы курс оставался гибким и мог обновляться в соответствии с новыми научными данными и инструментами моделирования, что особенно актуально для быстро развивающихся областей, таких как нанотехнологии. Таким образом, последовательное прохождение всех этапов позволяет создать структурированный, доступный и практически ориентированный дистанционный курс, соответствующий современным требованиям к подготовке специалистов в области фотоники.

Результаты разработки материалов дистанционного курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем

Первая лекция посвящена изучению особенностей низкоразмерных систем и элементарных наноструктур из системы квантовых ям, нитей, точек и полупроводниковых. Вторая лекция посвящена изучению методов квантовой механики для моделирования квантово-размерных систем. Третья лекция посвящена изучению численных методов в моделировании квантово-размерных систем. Четвёртая лекция посвящена изучению программного обеспечения и инструментов для моделирования квантово-размерных систем. Пятая лекция посвящена изучению моделирования низкоразмерных систем из на-

ночастиц и кластеров. Шестая лекция посвящена изучению моделирования квантовых точек и проволок. Седьмая лекция посвящена изучению электронных и транспортных свойств квантово-размерных систем. Восьмая лекция посвящена изучению двумерного электронного газа в МДП-структурах. Девятая лекция посвящена изучению квантового эффекта Холла в двумерном электронном газе. Десятая лекция посвящена изучению транспортных явлений в наноструктурах из квантово-размерных систем. Одиннадцатая лекция посвящена изучению туннелирования через квантово-размерные структуры. Двенадцатая лекция посвящена изучению моделирования оптических и магнитных свойств наноструктур на основе квантово-размерных систем. Тринадцатая лекция посвящена изучению моделирования структур одноэлектроники. Четырнадцатая лекция посвящена изучению статистической физики и термодинамики квантово-размерных систем. Пятнадцатая лекция посвящена изучению моделирования молекулярных систем.

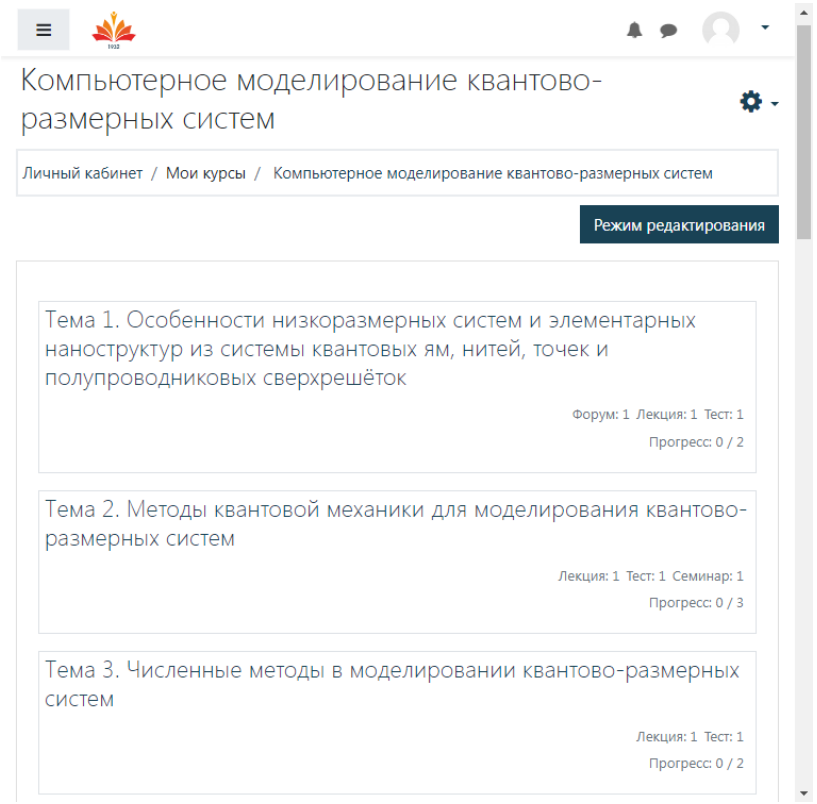


Рис. 1. Страница тематических модулей первой зачётной единицы дистанционного курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 1 приведено изображение страницы тематических модулей первой зачётной единицы дистанционного курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 2 приведено изображение страницы тематических модулей второй зачётной единицы дистанционного курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 3 приведено изображение страницы тематических модулей третьей зачётной единицы дистанционного курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

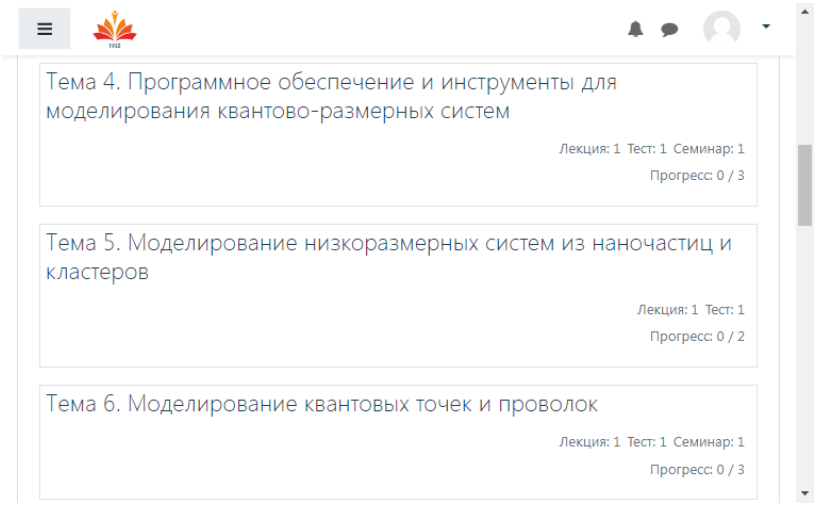


Рис. 2. Страница тематических модулей второй зачётной единицы дистанционного курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

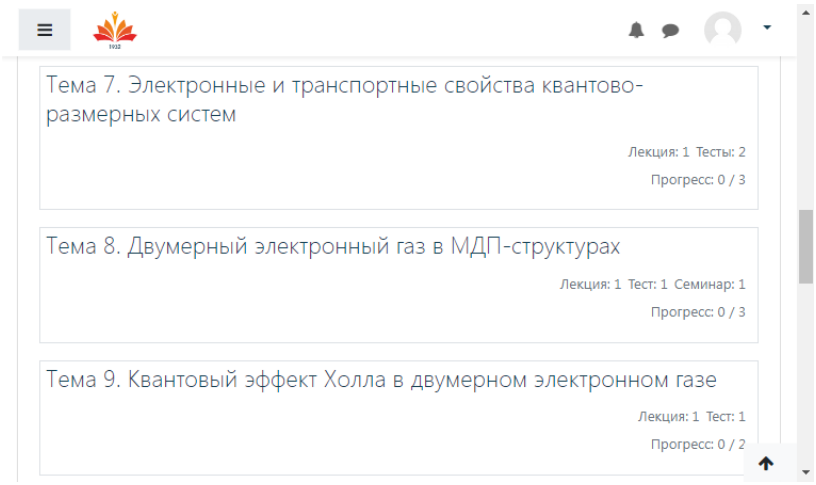


Рис. 3. Страница тематических модулей третьей зачётной единицы дистанционного курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 4 приведено изображение страницы тематических модулей четвёртой зачётной единицы курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 5 приведено изображение страницы тематических модулей пятой зачётной единицы курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 6 приведено изображение страницы элементов первой темы курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 7 приведено изображение страницы элементов второй темы дистанционного курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

На рис. 8 приведено изображение страницы элементов третьей темы дистанционного

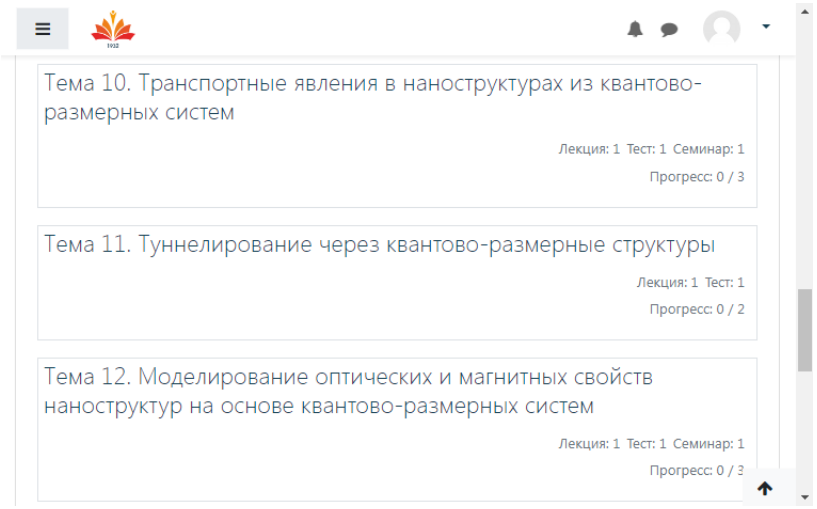


Рис. 4. Страница тематических модулей четвёртой зачётной единицы дистанционного курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

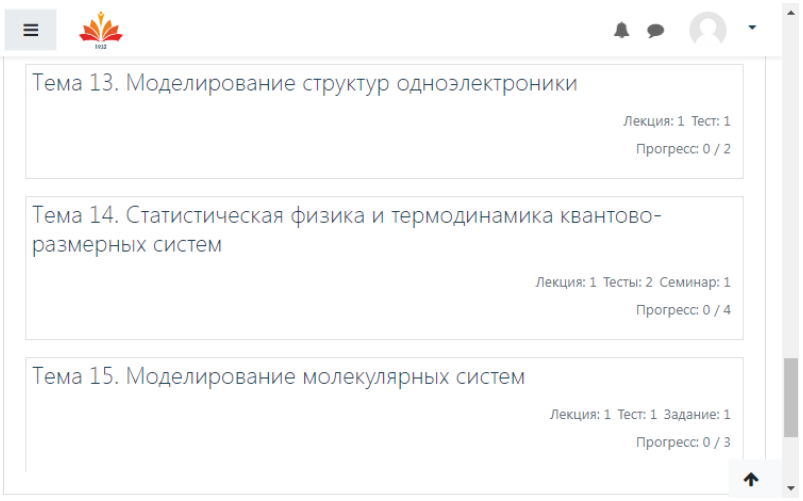


Рис. 5. Страница тематических модулей пятой зачётной единицы дистанционного курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

Первое занятие проводится в форме теста по особенностям низкоразмерных систем и элементарных наноструктур из системы квантовых ям, нитей, точек и полупроводниковых сверхрешёток. Второе занятие проводится в форме теста по методам квантовой механики для моделирования квантово-размерных систем. Третье занятие проводится в форме семинара по методам квантовой механики для моделирования квантово-размерных систем. Четвёртое занятие проводится в форме теста по численным методам в моделировании квантово-размерных систем. Пятое занятие проводится в форме теста по программному обеспечению и инструментам для моделирования квантово-размерных систем. Шестое занятие проводится в форме семинара по программному обеспечению и инструментам для моделирования квантово-размерных систем. Седьмое занятие проводится в форме теста по моделированию низкоразмерных систем из наночастиц и кластеров. Восьмое занятие проводится в форме теста по моделированию квантовых точек и проволок. Девятое занятие проводится в форме семинара по

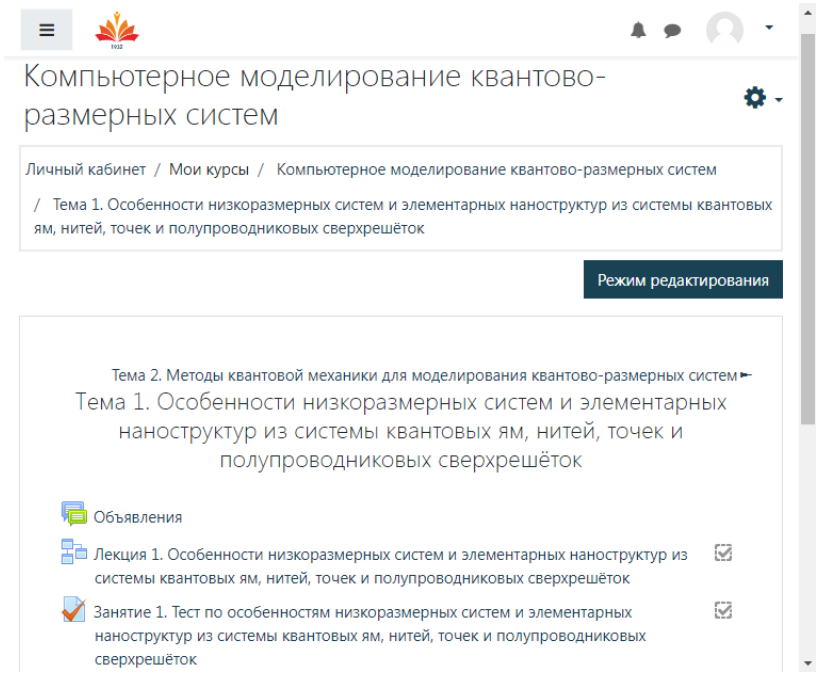


Рис. 6. Страница элементов первой темы дистанционного курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

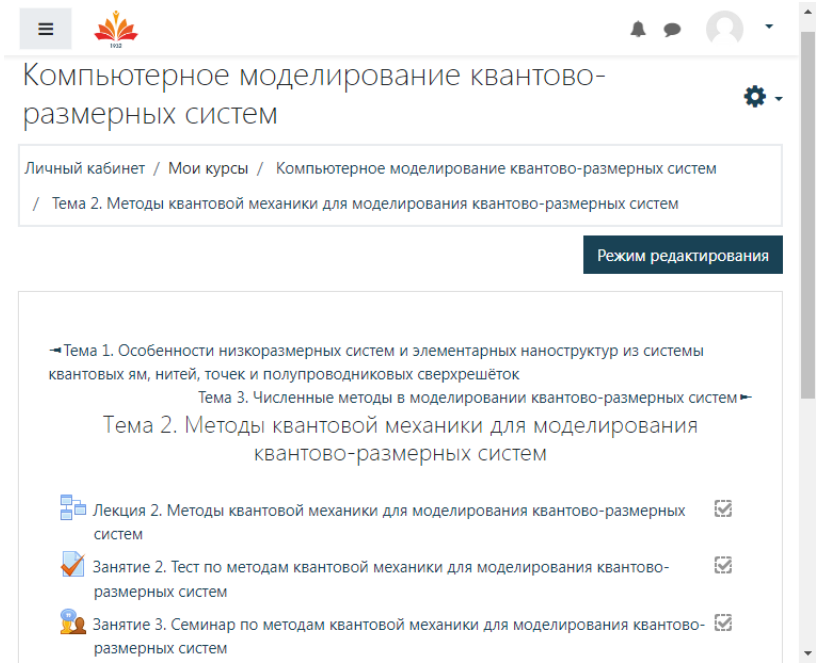


Рис. 7. Страница элементов второй темы дистанционного курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

моделированию квантовых точек и проволок. Десятое занятие проводится в форме теста по электронным и транспортным свойствам квантово-размерных систем. Одиннадцатое занятие проводится в форме первой контрольной работы. Двенадцатое занятие проводится в форме теста по двумерному электронному газу в МДП-структурах. Тринадцатое занятие проводится в форме семинара по двумерному электронному газу в МДП-структурах. Четырнадцатое занятие проводится в форме теста по квантово-

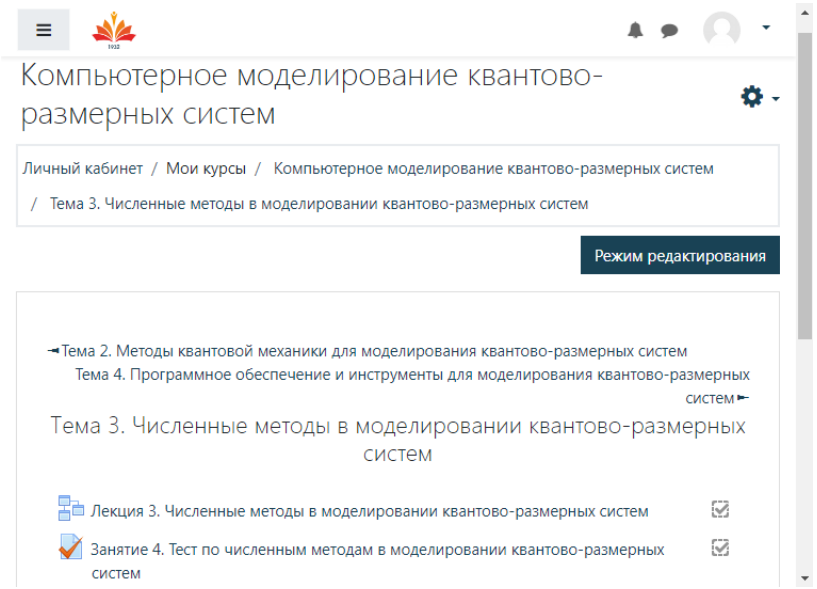


Рис. 8. Страница элементов третьей темы дистанционного курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем, созданного на образовательном портале университета в системе управления обучением MOODLE.

му эффекту Холла в двумерном электронном газе. Пятнадцатое занятие проводится в форме теста по транспортным явлениям в наноструктурах из квантово-размерных систем. Шестнадцатое занятие проводится в форме семинара по транспортным явлениям в наноструктурах из квантово-размерных систем. Семнадцатое занятие проводится в форме теста по туннелированию через квантово-размерные структуры. Восемнадцатое занятие проводится в форме теста по моделированию оптических и магнитных свойств наноструктур пониженной размерности на основе квантово-размерных систем. Девятнадцатое занятие проводится в форме семинара по моделированию оптических и магнитных свойств наноструктур на основе квантово-размерных систем. Двадцатое занятие проводится в форме теста по моделированию структур одноэлектроники. Двадцать первое занятие проводится в форме теста по статистической физике и термодинамике квантово-размерных систем. Двадцать второе занятие проводится в форме семинара по статистической физике и термодинамике квантово-размерных систем. Двадцать третье занятие проводится в форме второй контрольной работы. Двадцать четвёртое занятие проводится в форме теста по моделированию молекулярных систем. Двадцать пятое занятие проводится в форме итоговой работы по компьютерному моделированию квантово-размерных систем.

Процесс разработки курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем продемонстрировал, что успешное педагогическое проектирование дистанционного образования в области высокотехнологичных направлений, таких как моделирование квантово-размерных систем, требует комплексного подхода, сочетающего глубину теоретической подготовки с практической применимостью знаний. Важнейшим результатом стало формирование структурированного тематического плана, который обеспечивает логическую последовательность изучения материала от базовых физических принципов до сложных численных методов и программных инструментов, что позволяет студентам постепенно наращивать компетенции в области нанотехнологий и квантовой инженерии.

Одним из ключевых достижений курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем является интеграция теории и практики через использование современных программных пакетов и численных методов, что обеспечивает не только

усвоение фундаментальных знаний, но и развитие навыков приложения этих знаний в реальных задачах моделирования. Такой подход позволяет студентам не только анализировать электронные и транспортные свойства наноструктур, но и разрабатывать собственные модели, включая оптимизацию параметров квантовых точек и сверхрешёток, что соответствует современным требованиям к подготовке специалистов в сфере наноинженерии.

Особое значение в проектировании курса имело решение задачи мотивации и вовлечённости студентов в дистанционной образовательной среде. Введение интерактивных элементов, таких как форумы для обсуждения теоретических концепций, групповые проекты по моделированию конкретных наноструктур и системы взаимной оценки работ, позволило создать условия для активного взаимодействия обучающихся и формирования сообщества единомышленников. Это особенно важно в контексте сложных технических дисциплин, где обмен идеями и решениями конкретных задач существенно повышает качество усвоения материала.

Важным аспектом стало техническое обеспечение курса в системе управления обучением MOODLE, включая создание мультимедийных ресурсов, таких как лекции с разбором физических принципов квантово-размерных эффектов, интерактивные симуляции и шаблоны кода для моделирования. Такое методическое сопровождение позволяет студентам с различным уровнем подготовки эффективно осваивать курс, минимизируя технические барьеры при работе с программным обеспечением. Кроме того, интеграция с внешними инструментами, такими как Jupyter Notebook и GitHub, расширяет возможности для выполнения практических заданий и совместной работы над проектами.

Оценка эффективности курса показала, что сочетание автоматизированных систем контроля с экспертной проверкой проектных работ позволяет объективно оценивать не только теоретические знания студентов, но и их умение применять методы моделирования для решения реальных задач. Автоматизированные тесты и домашние задания по численным расчётам обеспечивают регулярную обратную связь, в то время как проектные работы, такие как моделирование транспортных свойств наноструктур или квантового эффекта Холла, позволяют оценить глубину понимания и креативность обучающихся. Это подтверждает адекватность выбранной системы оценки для формирования профессиональных компетенций в области компьютерного моделирования.

Процесс пилотного тестирования курса выявил необходимость адаптации учебных материалов под конкретные потребности студентов и технические возможности. Обратная связь от обучающихся позволила скорректировать формулировки заданий, улучшить наглядность презентаций и дополнить курс материалами для углублённого изучения отдельных тем, таких как статистическая физика наносистем или моделирование молекулярных структур. Важным выводам стало понимание того, что дистанционные курсы требуют постоянного мониторинга и обновления, особенно в быстро развивающихся областях, таких как нанотехнологии и квантовые вычисления.

Ещё одним значимым результатом разработки дистанционного курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем стало формирование компетенций, связанных с анализом экспериментальных данных и их сопоставлением с результатами моделирования. Например, задания по моделированию оптических и магнитных свойств наноструктур или сравнению расчётных спектров с экспериментальными данными развивают у студентов критическое мышление и умение интерпретировать научные результаты. Это соответствует современным требованиям к специалистам, которые должны не только владеть инструментами моделирования, но и уметь их применять для решения прикладных задач в научных исследованиях и промышленности.

Важной особенностью курса стало использование междисциплинарного подхода, со-

четающего знания из области квантовой механики, статистической физики, полупроводниковой электроники и оптики. Такой подход позволяет студентам видеть взаимосвязь между различными аспектами моделирования наноструктур, например, между электронными свойствами квантовых точек и их оптическими характеристиками. Это способствует формированию целостного представления о квантово-размерных системах и их приложениях в современных технологиях.

Опыт разработки курса по компьютерному моделированию квантовых систем пониженной размерности подтвердил, что дистанционное обучение в технических дисциплинах требует особого внимания к техническому сопровождению и поддержке студентов. Регулярное обновление учебных материалов, консультационная поддержка и своевременное решение технических проблем с программным обеспечением играют ключевую роль в успешном обучении. В данном случае оказалось необходимым предусмотреть не только инструкции по установке программных пакетов, но и создание резервных вариантов выполнения заданий для студентов с ограниченными вычислительными ресурсами. Курс также продемонстрировал высокую степень соответствия современным требованиям к подготовке специалистов в области нанотехнологий, где востребованными являются навыки работы с численными методами, программным обеспечением и анализом данных. Включение тем, посвящённых моделированию молекулярных систем и одноэлектронных устройств, расширяет горизонты студентов и позволяет им ориентироваться в различных областях применения нанотехнологий, таких как фотоника, спинтроника и квантовые вычисления. В целом, разработка данного дистанционного курса показала, что успешность обучения зависит не только от качества методических материалов, но и от гибкости системы, способности адаптироваться к изменениям в научно-технической сфере и потребностям студентов. Это подтверждает необходимость постоянного мониторинга и совершенствования курса с учётом новых достижений в области моделирования квантово-размерных систем и развития вычислительных технологий. Таким образом, данный опыт может служить основой для создания аналогичных курсов в других областях высокотехнологичного образования.

Дистанционный курс по компьютерному моделированию квантово-размерных систем построен с использованием модульной технологии построения курса, позволяющей эффективно управлять темпом продвижения по курсу. Разработанный дистанционный курс позволяет применять смешанную технологию преподавания курса компьютерного моделирования квантово-размерных систем 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 компьютерного моделирования квантово-размерных систем. Результаты исследования могут быть использованы для разработки новых методик преподавания курса компьютерного моделирования квантово-размерных систем.

Заключение

В настоящей работе проведено всестороннее исследование дистанционного курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем в системе управления обучением MOODLE. В работе описан результат разработки курса по компьютерному моделированию квантово-размерныхх систем, который готов к началу использования в учебном процессе в университете, позволяет автоматизировать проверку знаний по компьютерному моделированию квантово-размерных систем. Дистанционный курс по компьютерному моделированию квантово-размерных системе, созданный в системе управления обучением MOODLE, способствует систематизации хранения учебного

материала по компьютерному моделированию квантово-размерных систем. При изучении курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем система управления обучением MOODLE привносит то, что кроме основного курса по изучаемой дисциплине, используется материал для подготовки в домашних условиях, который позволяет расширить учебное содержание, а также провести дифференциацию учебного материала в соответствии с индивидуальными потребностями и запросами студентов, изучающих курс компьютерного моделирования квантово-размерных систем. Система управления обучением MOODLE позволяет открывать и закрывать тематические модели в соответствии с временем изучения, что позволяет поддерживать необходимый темп продвижения по курсу компьютерного моделирования квантово-размерных систем.

Выводы по работе можно сформулировать следующим образом:

1. проведённый анализ научной литературы по физике квантово-размерных систем показал существование возрастающих потребностей в создании курсов по компьютерному моделированию квантово-размерных систем для различных уровней образования,
2. разработан оригинальный дистанционный курс по компьютерному моделированию квантово-размерных систем, который готов к началу использования в учебном процессе университета,
3. созданные задания и тесты позволяют проводить проверку знаний студентов по курсу компьютерного моделирования квантово-размерных систем в условиях смешанного обучения или дистанционного обучения физике квантово-размерных систем.

Задачи работы решены полностью.

Гипотеза научного исследования, состоящая в том, что если использовать курс по компьютерному моделированию квантово-размерных систем, основанный на комбинации теоретических методов и численных методов в процессе изучения квантовой физики квантово-размерных систем, то можно повысить познавательный интерес студентов к физике квантово-размерных систем, подтверждена полностью. В качестве подтверждения гипотезы исследования спроектирован дистанционный курс по компьютерному моделированию квантово-размерных систем, основанный на комбинации теоретических методов и численных методов в процессе изучения физики квантово-размерных систем, позволяющий повысить познавательный интерес студентов к физике и компьютерному моделированию квантово-размерных систем по традиционной, смешанной и дистанционной формам обучения с применением компьютеров.

Разработанный дистанционный курс по компьютерному моделированию квантово-размерных систем может занять особое место среди дистанционных курсов, предназначенных для студентов физико-математических профилей подготовки университетов. Дистанционный курс по компьютерному моделированию квантово-размерных систем, созданный в системе управления обучением MOODLE, способен стать эффективным помощником, автоматизирующим наиболее трудоёмкие элементы труда преподавателя в процессе преподавания учебных дисциплин. Созданный дистанционный курс по компьютерному моделированию квантово-размерных систем позволит планировать, организовывать и проводить изучение теоретического материала курса по компьютерному моделированию квантово-размерных систем в дистанционной или смешанной форме обучения.

Список использованных источников

1. Ren Shang Yuan, Song Jian. A simple scheme for calculating quantum confinement effects in low dimensional systems // Solid state communications. — 1998. — Dec. —

Vol. 109, no. 4. — P. 243–247. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/s0038-1098(98)00565-1.

2. Pellegrini Giovanni, Mattei Giovanni, Mazzoldi Paolo. Finite depth square well model: applicability and limitations // Journal of applied physics. — 2005. — Mar. — Vol. 97, no. 7. — URL: http://dx.doi.org/10.1063/1.1868875.

3. Fu Huaxiang, Wang Lin-Wang, Zunger Alex. Comparison of the $k \cdot p$ and the direct diagonalization approaches for describing the electronic structure of quantum dots // Applied physics letters. — 1997. — Dec. — Vol. 71, no. 23. — P. 3433–3435. — URL: http://dx.doi.org/10.1063/1.120421.

4. Mielnik-Pyszczorski Adam, Gawarecki Krzysztof, Machnikowski Paweł. Limited accuracy of conduction band effective mass equations for semiconductor quantum dots // Scientific reports. — 2018. — Feb. — Vol. 8, no. 1. — URL: http://dx.doi.org/10.1038/s41598-018-21043-3.

5. Effective approach for strained InAs/GaAs quantum structures / I. Filikhin [et al.] // Physica E: low-dimensional systems and nanostructures. — 2008. — Feb. — Vol. 40, no. 4. — P. 715–723. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.physe.2007.08.161.

6. Nair Selvakumar V., Ramaniah Lavanya M., Rustagi Kailash C. Electron states in a quantum dot in an effective-bond-orbital model // Physical Review B. — 1992. — Mar. — Vol. 45, no. 11. — P. 5969–5979. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/physrevb.45.5969.

7. Gomez-Campos F. M., Rodríguez-Bolivar S., Carceller J. E. Computational improvement of the normalized plane-wave method and its applications in quantum dot studies // Mathematical and computer modelling. — 2010. — Apr. — Vol. 51, no. 7-8. — P. 873–879. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.mcm.2009.08.030.

8. Effective interaction for charge carriers confined in quasi-one-dimensional nanostructures / S. Bednarek [et al.] // Physical Review B. — 2003. — July. — Vol. 68, no. 4. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/physrevb.68.045328.

9. Movilla J. L., Pi M., Planelles J. Dielectric confinement in quantum dots of arbitrary shape within the local spin density approximation: Diluted regimes in elongated quantum dots // Journal of applied physics. — 2010. — Sept. — Vol. 108, no. 6. — URL: http://dx.doi.org/10.1063/1.3487479.

10. Dick Rainer. A model system for dimensional competition in nanostructures: a quantum wire on a surface // Nanoscale research letters. — 2008. — Apr. — Vol. 3, no. 4. — P. 140–144. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/s11671-008-9126-4.

11. Quantum embedding theories to simulate condensed systems on quantum computers / Christian Vorwerk [et al.] // Nature computational science. — 2022. — July. — Vol. 2, no. 7. — P. 424–432. — URL: http://dx.doi.org/10.1038/s43588-022-00279-0.

12. Hong Li, Xiao-Jun Kong. Exciton and donor binding energies in quantum-well wires and quantum dots a fractional-dimensional space approach // Chinese physics. — 2004. — Apr. — Vol. 13, no. 5. — P. 759–764. — URL: http://dx.doi.org/10.1088/1009-1963/13/5/032.

Сведения об авторах:

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

E-mail: elenailuskina2004@gmail.com

ORCID iD 0009-0001-2593-9829

Web of Science ResearcherID JRW-6162-2023

Original article
PACS 01.40.Di
OCIS 000.20600
MSC 00A79

Development of a course on the computer modeling of low-dimensional quantum systems within the Moodle learning management system

E. A. Ilyushkina

Ulyanovsk State Pedagogical University, 432000, Ulyanovsk, Russia

Submitted July 15, 2026
Resubmitted July 17, 2026
Published September 30, 2026

Abstract. The results of developing a distance learning course on the computer modeling of low-dimensional quantum systems within the learning management system MOODLE are presented. The results regarding the development of the thematic structure and instructional materials for this course are described.

Keywords: course, distance learning course, computer modeling, reduced-dimensionality system

References

1. Ren Shang Yuan, Song Jian. A simple scheme for calculating quantum confinement effects in low dimensional systems // Solid state communications. — 1998. — Dec. — Vol. 109, no. 4. — P. 243–247. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/s0038-1098(98)00565-1.

2. Hong Li, Xiao-Jun Kong. Exciton and donor binding energies in quantum-well wires and quantum dots a fractional-dimensional space approach // Chinese physics. — 2004. — Apr. — Vol. 13, no. 5. — P. 759–764. — URL: http://dx.doi.org/10.1088/1009-1963/13/5/032.

3. Quantum embedding theories to simulate condensed systems on quantum computers / Christian Vorwerk [et al.] // Nature computational science. — 2022. — July. — Vol. 2, no. 7. — P. 424–432. — URL: http://dx.doi.org/10.1038/s43588-022-00279-0.

4. Dick Rainer. A model system for dimensional competition in nanostructures: a quantum wire on a surface // Nanoscale research letters. — 2008. — Apr. — Vol. 3, no. 4. — P. 140–144. — URL: http://dx.doi.org/10.1007/s11671-008-9126-4.

5. Pellegrini Giovanni, Mattei Giovanni, Mazzoldi Paolo. Finite depth square well model: applicability and limitations // Journal of applied physics. — 2005. — Mar. — Vol. 97, no. 7. — URL: http://dx.doi.org/10.1063/1.1868875.

6. Effective interaction for charge carriers confined in quasi-one-dimensional nanostructures / S. Bednarek [et al.] // Physical Review B. — 2003. — July. — Vol. 68, no. 4. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/physrevb.68.045328.

7. Movilla J. L., Pi M., Planelles J. Dielectric confinement in quantum dots of arbitrary shape within the local spin density approximation: Diluted regimes in elongated quantum dots // Journal of applied physics. — 2010. — Sept. — Vol. 108, no. 6. — URL: http://dx.doi.org/10.1063/1.3487479.

8. Effective approach for strained InAs/GaAs quantum structures / I. Filikhin [et al.] // Physica E: low-dimensional systems and nanostructures. — 2008. — Feb. — Vol. 40, no. 4. — P. 715–723. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.physe.2007.08.161.

9. Fu Huaxiang, Wang Lin-Wang, Zunger Alex. Comparison of the $k \cdot p$ and the direct diagonalization approaches for describing the electronic structure of quantum dots // Applied physics letters. — 1997. — Dec. — Vol. 71, no. 23. — P. 3433–3435. — URL: http://dx.doi.org/10.1063/1.120421.

10. Mielnik-Pyszczorski Adam, Gawarecki Krzysztof, Machnikowski Paweł. Limited accuracy of conduction band effective mass equations for semiconductor quantum dots // Scientific reports. — 2018. — Feb. — Vol. 8, no. 1. — URL: http://dx.doi.org/10.1038/s41598-018-21043-3.

11. Nair Selvakumar V., Ramaniah Lavanya M., Rustagi Kailash C. Electron states in a quantum dot in an effective-bond-orbital model // Physical Review B. — 1992. — Mar. — Vol. 45, no. 11. — P. 5969–5979. — URL: http://dx.doi.org/10.1103/physrevb.45.5969.

12. Gomez-Campos F. M., Rodríguez-Bolivar S., Carceller J. E. Computational improvement of the normalized plane-wave method and its applications in quantum dot studies // Mathematical and computer modelling. — 2010. — Apr. — Vol. 51, no. 7-8. — P. 873–879. — URL: http://dx.doi.org/10.1016/j.mcm.2009.08.030.

Information about authors:

Elena Alekseevna Ilyushkina — student of the Faculty of Physics, Mathematics and Technological Education of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Ulyanovsk State Pedagogical University", Ulyanovsk, Russia.

E-mail: elenailuskina2004@gmail.com

ORCID iD 0009-0001-2593-9829

Web of Science ResearcherID JRW-6162-2023