



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-31-2-41-51>

УДК 372.8

НАНОТЕХНОЛОГИЯ И ДОПОЛНЕННАЯ РЕАЛЬНОСТЬ КАК ОСНОВЫ ВИРТУАЛИЗАЦИИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ОБУЧЕНИИ

В. В. БЕЛЯЕВ^{1,2}, Т. Н. ГРАНЬ, А. А. ЗОРИНА³, В. Г. КОСТЯКОВА¹, М. В. ШЕВЧУК¹,
В. В. МИНЯЙЛОВ⁴, В. А. ЧЕРТОПОЛОХОВ⁴

¹Государственный университет просвещения (Москва, Российская Федерация)

²Российский университет дружбы народов (Москва, Российская Федерация)

³Школа № 760 имени А. П. Маресьева (Москва, Российская Федерация)

⁴Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова (Москва, Российская Федерация)

Аннотация. Рассмотрены теоретические и практические аспекты применения технологий виртуальной и дополненной реальности (VR/AR) в образовательном процессе. Проанализирован потенциал этих технологий для совершенствования образования, особенно в условиях необходимости дистанционного обучения. Выделены ключевые преимущества VR/AR-технологий: визуализация сложных научных концепций, доступ к виртуальным моделям дорогостоящего оборудования, безопасность при работе с потенциально опасными объектами, повышение вовлеченности обучающихся. Приведен практический опыт внедрения VR/AR-технологий в образовательный процесс Государственного университета просвещения и Московского государственного университета на примере нескольких дисциплин: разработка мобильного приложения дополненной реальности для изучения архитектуры компьютера в рамках курса информатики; создание виртуальных лабораторных работ по дисциплине «Введение в физику нанотехнологии»; программа дополнительного образования по технологиям виртуальной и дополненной реальности; применение AR для демонстрации 3D-моделей молекул на химическом факультете МГУ. Интеграция VR/AR-технологий в образовательный процесс способствует формированию у обучающихся современных компетенций, расширению содержания преподаваемых дисциплин и повышению эффективности обучения в целом.

Ключевые слова: виртуальная реальность, дополненная реальность, виртуализация, сфера образования, нанотехнологии, дистанционное обучение, образовательные технологии.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Нанотехнология и дополненная реальность как основы виртуализации образовательного материала при обучении / В. В. Беляев [и др.] // Цифровая трансформация. 2025. Т. 31, № 2. С. 41–51. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-31-2-41-51>.

NANOTECHNOLOGY AND AUGMENTED REALITY AS THE BASIS FOR VIRTUALIZATION OF EDUCATIONAL MATERIAL IN TRAINING

VICTOR V. BELYAEV^{1,2}, TATIANA N. GRAN, ALINA A. ZORINA³,
VICTORIA G. KOSTYAKOVA¹, MIKHAIL V. SHEVCHUK¹,
VLADIMIR V. MINYAILOV⁴, VIKTOR A. CHERTOPOLOKHOV⁴

¹State University of Education (Moscow, Russian Federation)

²RUDN University (Moscow, Russian Federation)

³School No 760 named after A. P. Maresyev (Moscow, Russian Federation)

⁴Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russian Federation)

Abstract. The article considers theoretical and practical aspects of using virtual and augmented reality (VR/AR) technologies in the educational process. The potential of these technologies for improving education is analyzed, especially in the context of the need for distance learning. The key advantages of VR/AR technologies are high-

lighted: visualization of complex scientific concepts, access to virtual models of expensive equipment, safety when working with potentially dangerous objects, and increased student engagement. The practical experience of introducing VR/AR technologies into the educational process of the State University of Education and Moscow State University is considered using the example of several disciplines: development of an augmented reality mobile application for studying computer architecture as part of a computer science course; creation of virtual laboratory works on the discipline “Introduction to the Physics of Nanotechnology”; additional education program in virtual and augmented reality technologies; use of AR to demonstrate 3D models of molecules at the Chemistry Department of Moscow State University. The integration of VR/AR technologies into the educational process contributes to the formation of modern competencies in students, expansion of the content of taught disciplines and improvement of the effectiveness of learning in general.

Keywords: virtual reality, augmented reality, virtualization, education, nanotechnology, distance learning, educational technologies.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Belyaev V. V., Gran T. N., Zorina A. A., Kostyakova V. G., Shevchuk M. V., Minyailov V. V., Chertopolokhov V. A. (2025) Nanotechnology and Augmented Reality as the Basis for Virtualization of Educational Material in Training. *Digital Transformation*. 31 (2), 41–51. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2025-31-2-41-51> (in Russian).

Введение

Переход к дистанционному обучению школьников и студентов во время пандемии вызвал необходимость изменения методик преподавания дисциплин, что обусловило увеличение доли технологий виртуальной и дополненной реальности (VR/AR) при проведении занятий. Подходы и требования к системам виртуальной и дополненной реальности рассматриваются ведущими учеными и специалистами в научных и научно-методических исследованиях, например, в докладе вице-президента группы в сфере виртуальной и дополненной реальности компании Google Клея Бейвора (Clay Bavor) «Подходы и требования к системам виртуальной/дополненной реальности», в статьях [1, 2]. На рис. 1 продемонстрировано соотношение различных видов реальности в мировой практике [1].

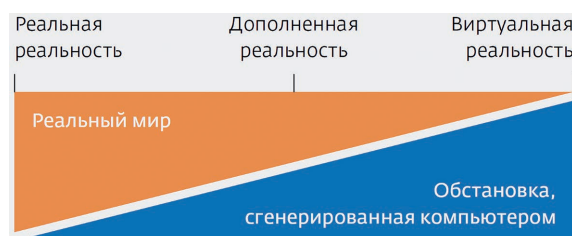


Рис. 1. Соотношение видов реальности
Fig. 1. Correlation of the reality types

Считается, что отсутствие непосредственного общения между преподавателем и обучающимися в школе или университете является существенным недостатком дистанционного обучения. Однако оно дает и ряд дополнительных преимуществ. Переход на дистанционное обучение, которое привело к увеличению доли VR/AR-технологий, позволяет существенно расширить содержание преподаваемых дисциплин и освоить обучающимися новые, ранее недоступные, компетенции. Проблемы виртуализации образования в условиях перехода на дистанционное преподавание обсуждаются и в работах зарубежных авторов [3–6]. Изучение возможности и целесообразности использования VR/AR-технологий в образовательном процессе требует уточнения определения основных понятий.

Под виртуальной реальностью (Virtual Reality, VR) понимают искусственно созданную компьютером трехмерную визуализированную среду, основанную на технологии компьютерной графики и видео в формате 360°, которая окружает пользователя и естественным образом реагирует на его действия, обычно с помощью иммерсивных дисплеев [7]. Портативные контроллеры обеспечивают распознавание жестов и отслеживание рук и тела, также может быть задействована тактильная (или сенсорная) обратная связь. Одним из примеров устройств, позволяющих обеспечивать данный вид реальности, является шлем виртуальной реальности Oculus Rift.

Дополненная реальность (Augmented Reality, AR) – это использование информации в режиме реального времени в виде текста, графики и звука, интегрированных с объектами реального мира. Именно применение элементов реального мира отличает дополненную реальность от виртуальной [8]. В сфере образования AR-технология позволяет применять в процессе обучения различные интерактивные книги, развивающие игры, обучающие приложения, моделирование объектов и ситуаций, а также приложения для тренировки навыков. Дополненная реальность имеет широкий набор доступных инструментов для повышения качества образования и уровня заинтересованности обучающихся к работе с новой технологией, обеспечивает безопасность работы с виртуальными учебными объектами [9, 10].

На уроках физики, информатики, химии, географии, биологии и других предметов применение различных AR-кубов и интерактивных игр позволяет изучать объекты и явления окружающего мира, что в реальных условиях могло быть недоступно или опасно. Например, использование AR-технологий целесообразно при изучении строения архитектуры компьютера или взаимодействия радиоактивных химических элементов, для визуализации сечения геометрических фигур, редких астрономических явлений и исторических событий. Применение набора трехмерных раскрасок, которые можно оживить с помощью мобильного приложения, позволит наглядно и интересно изучить строение биологической клетки на 3D-модели.

В статье обобщен подход к интеграции технологий виртуальной и дополненной реальности в образовательный процесс высшей школы при преподавании технических, естественнонаучных и педагогических дисциплин. Исследован педагогический потенциал VR/AR-технологий в контексте трансформации методов обучения, разработан комплексный подход к проектированию виртуальных лабораторных работ по нанотехнологии, создано специализированное приложение дополненной реальности для визуализации сложных технических объектов и оценки образовательной результативности разработанных подходов на основе педагогического эксперимента.

Новизна предлагаемого подхода заключается в применении методологии, позволяющей студентам не только использовать готовые VR/AR-решения, но и самостоятельно проходить полный цикл создания приложений дополненной реальности – от проектирования 3D-моделей до функционального мобильного приложения или тренажерной системы. Предложена междисциплинарная модель обучения, объединяющая компьютерные технологии и естественнонаучные дисциплины на единой VR/AR-платформе, что существенно обогащает содержание образования материалами ведущих мировых научных центров.

Описание предлагаемой образовательной методики

Рассмотрим использование элементов виртуальной и дополненной реальности на занятиях по дисциплинам «Программное обеспечение ЭВМ», «Архитектура вычислительных систем», «Облачные технологии в образовании», «Введение в физику нанотехнологии» и «Физика», изучаемым в Государственном университете просвещения. На начальном этапе целесообразно при изучении информатики сформировать у обучающихся знания и умения, необходимые для работы с соответствующими устройствами и со средствами разработки приложений для них. Студентам, заинтересованным в расширении знаний по информатике и получении современных представлений об устройстве информационных систем, предлагается разработать мобильное приложение на основе дополненной реальности. Данное приложение позволит, например, объединить в одном месте модели внутренних элементов персонального компьютера и их описание для дальнейшего изучения (рис. 2).

Разработка приложения состоит из нескольких этапов и подразумевает обширную работу обучающихся с трехмерным редактором (Blender, 3ds Max), игровым движком Unity, библиотекой работы с дополненной реальностью Vuforia, а также с интегрированными средами Visual Studio и Android Studio. Основное внимание уделяется принципам создания AR-меток и интерфейса пользователя, работе с библиотекой Vuforia, загрузке и использованию приложения на мобильном устройстве (рис. 3).

Дополнительные знания в области виртуальной и дополненной реальности, полученные на информатике, студенты могут применять при освоении других дисциплин. Широкое использование VR/AR-технологий возможно в процессе преподавания дисциплины «Введение в физику нанотехнологии».

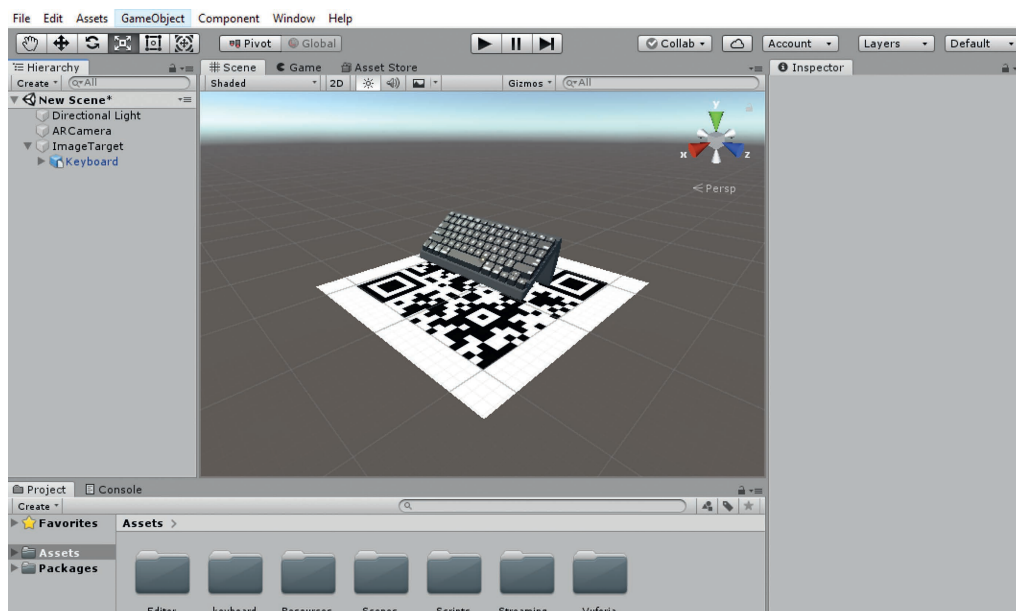


Рис. 2. Добавление 3D-модели
Fig. 2. 3D model adding

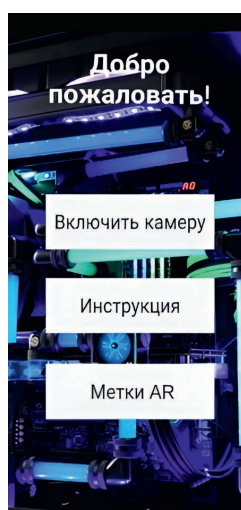


Рис. 3. Пример разработанного приложения
Fig. 3. Example of application developed

В очном формате обучения на занятиях в университете студенты физико-математического факультета Государственного университета просвещения работают с приборами учебно-научной лаборатории теоретической и прикладной нанотехнологии, осваивают методы измерений и сами выполняют измерения, обрабатывают полученные результаты. С учетом имеющегося не только в университете, но и в большинстве образовательных учреждений лабораторного оборудования акцент на занятиях делается в пользу извлечения информации о структуре и свойствах объектов на нанометровом масштабе. При анализе полученных результатов обсуждаются нанотехнологические методы измерений, соответствующее оборудование, применение наноструктурированных материалов. Но, по сути, лабораторная работа по данной дисциплине в таком виде является развитием обычного лабораторного практикума по общей физике.

Вынужденный переход на дистанционное обучение как школьников и студентов, так и преподавателей заставил последних пересмотреть содержание и формат обучения. Использование VR/AR-технологий позволило создать условия для знакомства обучающихся с самыми современными достижениями в области нанотехнологии и создания объектов нанотехнологии в процессе

изучения дисциплины «Введение в физику нанотехнологии» [11]. Для подготовки виртуальных студенческих лабораторных работ были использованы следующие темы:

- виды электронной и зондовой микроскопии;
- электронная оже-спектроскопия;
- рентгеновская флуоресцентная спектрометрия;
- вторично-ионная масс-спектрометрия (ВИМС);
- времяпролетная вторично-ионная масс-спектрометрия (ВП ВИМС);
- синхротронное излучение (СИ);
- лазер на свободных электронах (ЛСЭ).

При разработке лабораторных работ использовались современная литература, а также лекции ведущих специалистов России и зарубежных стран, статьи из ведущих международных журналов. Преподаватель дисциплины «Введение в физику нанотехнологии» профессор В. В. Беляев сам является одним из ведущих в России, СНГ и мире специалистов по данному направлению и на своих занятиях основывается на результаты исследований, полученные при общении с ведущими учеными на различных научных мероприятиях. Например, при освоении темы «Виды электронной и зондовой микроскопии» использовались материалы, изложенные в [12–14]. Для студентов были сформулированы задания, позволяющие ознакомиться с принципами работы приборов, их конструкцией, методам измерений. Значительная часть заданий предполагает обработку и анализ снимков различных нанообъектов (от технических до биологических), полученных разными известными методами. Студентами самостоятельно были освоены:

- методики зондовой микроскопии:
 - контактная атомно-силовая микроскопия (АСМ);
 - амплитудно-модуляционная АСМ;
 - АСМ-литография;
 - РПСМ – растровая прыжковая силовая микроскопия;
 - ЛСМ – латерально-силовая микроскопия;
 - СММ – силовая модуляционная микроскопия;
 - СМП – силовая микроскопия пьезоотклика;
 - ЭСМ – электростатическая силовая микроскопия;
 - КЗСМ – кельвин-зондовая силовая микроскопия;
 - МСМ – магнитно-силовая микроскопия;
 - СЕМ – сканирующая емкостная микроскопия.
 - СТМ – сканирующая туннельная микроскопия;
 - сканирующая термальная микроскопия;
 - отображение фототока;
 - АСМ-наноиндентирование;
 - электрохимические АСМ и СТМ;
- оптические методики:
 - конфокальная флуоресцентная микроскопия;
 - ближнепольная оптическая микроскопия;
 - лазерная конфокальная микроскопия;
 - флуоресцентная микроскопия;
 - микроскопия темного поля;
 - поляризационная микроскопия.

Для занятий по ВИМС использовались переработанные материалы лекции Л. Винса из Университета Осло (Норвегия). На их основе были составлены задания, в которых с помощью различных методов рассматривались количество вторичных ионов, выбиваемых первичными, пространственность изотопов элементов, потенциал ионизации, распознавание (селекция) частиц, имеющих практически одинаковую массу. На занятиях по ВП ВИМС изучались вопросы по материалам статьи из журнала [15], где наглядно представлено, на какие ионизированные фрагменты разбивается молекула лекарственного средства ванкомицин ($C_{66}H_{75}Cl_2N_9O_{24}$) при бомбардировке первичными ионами. Согласно [15], на рис. 4 показаны структурные формулы молекулы ванкомицина и вторично заряженных фрагментов, на которые молекула расщепляется пучком первичных ионов.

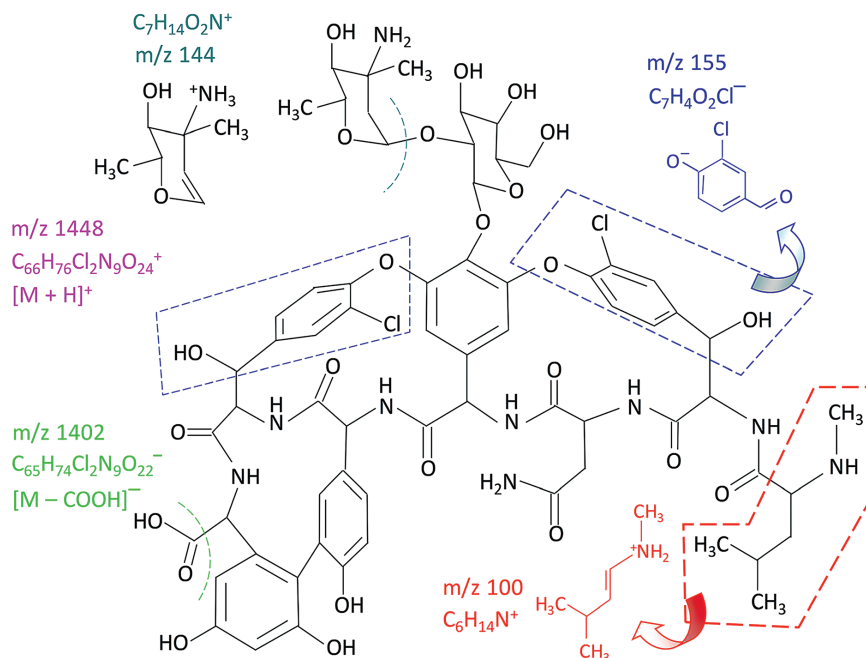


Рис. 4. Структурные формулы молекулы ванкомицина и вторично заряженных фрагментов
Fig. 4. Structural formulas of the vancomycin molecule and secondary charged fragments

На рис. 5 приведено количество отсчетов вторичных ионов различных фрагментов ванкомицина (интенсивность ионов) в зависимости от глубины проникновения первичного пучка. Кроме того, на рисунке показано распределение концентрации различных вторичных фрагментов ванкомицина по глубине при бомбардировке положительными ионами структуры с ванкомицином между слоями пиролитического графита (PLGA) на кремниевой подложке Si; даны изображения распределения фрагментов Cl^- (красный цвет) и $\text{C}_3\text{H}_3\text{O}_3^-$ (зеленый цвет) при глубинах 34, 103, 160 и 196 нм.

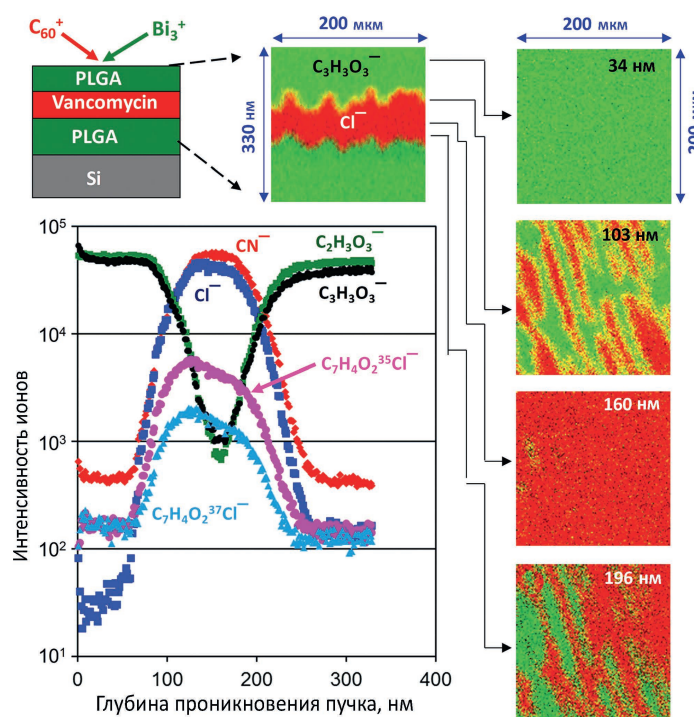


Рис. 5. Количество отсчетов вторичных ионов фрагментов ванкомицина (интенсивность ионов) в зависимости от глубины проникновения первичного пучка

Fig. 5. Number of secondary ion counts of vancomycin fragments (ion intensity) as a function of primary beam penetration depth

Кроме того, студентам Государственного университета просвещения на занятиях преподавались технологии СИ и ЛСЭ с использованием материалов лекции Дж. Фриша из национальной ускорительной лаборатории SLAC Стэнфордского университета (США). Если в обычном режиме преподавания есть возможность посетить сравнительно компактный центр синхротронного излучения Курчатовского института в Москве, то в дистанционном режиме только с использованием VR- и AR-технологий студенты могут присутствовать на другом конце Европы или в США, наблюдая установки длиной около 3,2 км (рис. 6) или ондуляторы для генерации СИ длиной 130 м с отклонением от прямолинейности 10 мкм (рис. 7). На рис. 6 приведено изображение линейного ускорителя частиц Linacs для генерации синхротронного излучения, расположенного в Стэнфордском ускорительном центре (США). Ускоритель можно использовать для лазера на свободных электронах. Характеристики ускорителя: низкая частота повторений, низкий средний ток (при комнатной температуре – 100 Гц); сверхпроводящий режим – частота от 10 кГц до 1 МГц; яркость пучка определяется источником электронов: типичный поперечник пучка 1 мкм по горизонтали и вертикали, показатель по продольному фазовому пространству – 5 мкм.



Рис. 6. Вид расположенного в Стэнфордском ускорительном центре (США) линейного ускорителя частиц Linacs для генерации синхротронного излучения
Fig. 6. View of the Linacs linear particle accelerator for generating synchrotron radiation located at the Stanford Accelerator Center (USA)

На рис. 7 показан ондулятор для генерации синхротронного излучения. Длина устройства составляет 130 м, отклонение траектории частиц от линейности – около 10 мкм.

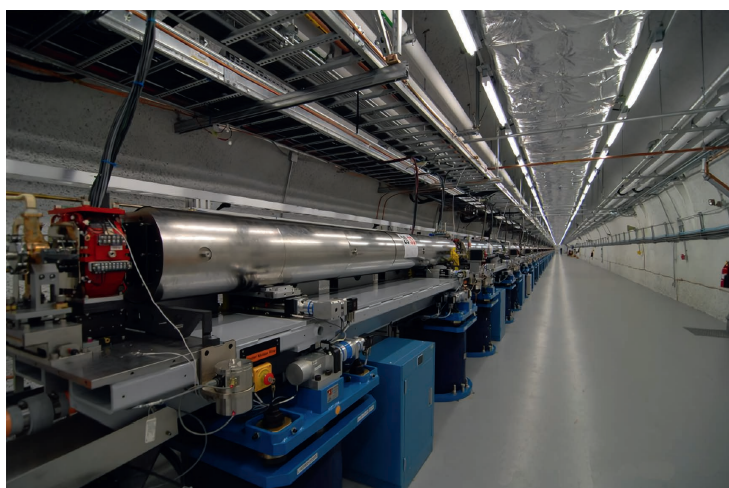


Рис. 7. Вид ондулятора для генерации синхротронного излучения
Fig. 7. Type of undulator for generating synchrotron radiation

Рассмотренная выше форма занятий предусматривает широкое применение VR/AR-технологий как преподавателями, так и студентами. Многие студенты с использованием этих технологий узнали принцип работы перечисленных измерительных приборов и установок. Им удалось виртуально проиллюстрировать процесс создания сложной микросхемы с десятками промежуточных технологических операций. Другим примером применения новых технологий является программа дополнительного образования «Технологии виртуальной и дополненной реальности», запущенная в 2020 г. в рамках Межфакультетского центра виртуальной реальности Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова (МГУ). Сочетание традиционных подходов на тренажерах и технологии дополненной реальности позволяет специалисту смоделировать ситуацию, максимально приближенную к реальности.

Алгоритмы тестирования, используемые в тренажерах, дают возможность непредвзято оценить действия человека в экстремальных условиях. Разработка тренажеров с применением VR/AR-технологий – это прикладная работа на стыке математики и биомедицины. Образовательная программа включает в себя знакомство с анатомией и физиологией вестибулярного и глазодвигательного аппарата человека, с показателями, помогающими оценить их совместную работу. Также изучаются методы создания имитационных сигналов, используемых в системах виртуальной реальности. Основные разделы курса включают описание общей структуры панорамной и компактной систем виртуальной реальности (рис. 8, 9), систем отслеживания движения и визуализации, динамического моделирования и гальванической стимуляции. Курс основан на семинаре по физике и механике, который преподается на механико-математическом факультете МГУ [16]. Одна из особенностей курса – изучение методов дополненной реальности в виртуальной среде, когда на виртуальное изображение накладывается дополнительная индикация.



Рис. 8. Панорамная система виртуальной реальности
Fig. 8. Panoramic virtual reality system



Рис. 9. Компактная система виртуальной реальности
Fig. 9. Compact virtual reality system

Задачи студентов включают изучение публикаций на тему виртуальной и дополненной реальности, реальных примеров применения технологий. Самопроверка может проводиться в виде коротких докладов о компаниях-разработчиках технологий и об их внедрении. Большой опыт использования технологии дополненной реальности накоплен на химическом факультете МГУ. В [17] рассматривается применение AR-технологий для наглядной демонстрации моделей молекул в процессе обучения химии [18]. Применение 3D-моделей и дополненной реальности, согласно [18], помогает студентам лучше понять пространственное строение молекул и связать его с их химическими свойствами, а AR-технологии повышают вовлеченность и мотивацию учащихся, способствуют развитию пространственного мышления.

Вышесказанное позволяет сделать вывод о том, что применение элементов VR/AR-технологий может являться эффективным инструментом для обучения различным дисциплинам. Это объясняется бесспорными преимуществами VR/AR-технологий там, где работа с реальными объектами может быть недостаточно безопасной, дорогостоящей или трудоемкой.

Заключение

1. Проведенное исследование демонстрирует возможности применения технологий виртуальной и дополненной реальности в образовательном процессе как эффективного инструмента для обучения различным дисциплинам, особенно в ситуациях, когда работа с реальными объектами недостаточно безопасна, дорогостояща или трудоемка. Разработанные подходы к созданию виртуальных лабораторных работ по нанотехнологии обеспечивают доступ студентов к изучению современных методов исследования наноструктур без необходимости использования дорогостоящего оборудования, а созданное программное обеспечение для визуализации архитектуры компьютера способствует формированию у студентов IT-направлений наглядного представления об изучаемых объектах.

2. Особую ценность имеет разработанная методология проектирования образовательных VR/AR-решений, которая включает создание трехмерных моделей, программирование приложений дополненной реальности и подходы к оценке их применения в учебном процессе. Междисциплинарный характер предлагаемых решений подтверждается применением VR/AR-технологий при изучении нанотехнологий, компьютерных наук, в биомедицинских исследованиях и химическом образовании, где 3D-модели молекул или биологических объектов способствуют лучшему пониманию их пространственного строения.

3. Представленный опыт может быть успешно адаптирован и в образовательной системе Республики Беларусь. Учитывая традиционно сильные позиции белорусских вузов в подготовке специалистов инженерного профиля, внедрение VR/AR-технологий может стать приоритетным направлением в техническом образовании. Перспективным представляется развитие межвузовского сотрудничества между образовательными учреждениями России и Беларуси для совместной разработки образовательных приложений.

4. Практическая значимость результатов заключается в возможности внедрения разработанных программных решений и методических материалов в образовательный процесс без значительных финансовых затрат. Апробация в условиях дистанционного обучения подтверждает применимость данного подхода для организации удаленного образовательного процесса и его потенциал для сокращения расходов на лабораторное оборудование.

5. Работа коллектива МГУ выполнена при поддержке Программы развития МГУ, проект научно-образовательной школы «Математические методы анализа сложных систем» № 23А-Ш05-05.

Список литературы

1. Беляев, В. В. Погружение в суперреальность. По результатам симпозиума SID 2014 / В. В. Беляев // *Электроника: Наука, Технология, Бизнес*. 2014. № 6. С. 32–44.
2. Беляев, В. В. Дисплеи для военного применения: специфика отрасли, современные технологии и вектор развития / В. В. Беляев, Д. Суарес // *Электроника: Наука, Технология, Бизнес*. 2017. № 6. С. 52–63. <https://doi.org/10.22184/1992-4178.2017.166.6.52.63>.
3. Huang, A. Teaching, Learning, and Assessment with Virtualization Technology / A. Huang // *Journal of Educational Technology Systems*. 2019. Vol. 47, No 4. P. 523–538. <https://doi.org/10.1177/0047239518812707>.
4. Ray, S. Virtualization of Science Education: A Lesson from the COVID-19 Pandemic / S. Ray, S. Srivastav // *Journal of Proteins and Proteomics*. 2020. Vol. 11. P. 77–80. <https://doi.org/10.1007/s42485-020-00038-7>.

5. Annappaiah, D. H. Virtualization Technologies and Techniques in Education Learning Applications / D. H. Annappaiah, V. K. Agrawal // World Academy of Science, Engineering and Technology. 2011. Vol. 59. P. 1824–1829.
6. Klement, M. Models of Integration of Virtualization in Education: Virtualization Technology and Possibilities of Its Use in Education / M. Klement // Computers & Education. 2017. Vol. 105. P. 31–43. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2016.11.006>.
7. LaValle, S. M. Virtual Reality / S. M. LaValle. UK: Cambridge University Press & Assessment, 2023.
8. Aukstakalnis, S. Practical Augmented Reality: A Guide to the Technologies, Applications, and Human Factors for AR and VR (Usability) / S. Aukstakalnis. USA: Addison-Wesley Professional Publ., 2016.
9. Иванова, А. В. Технологии виртуальной и дополненной реальности: возможности и препятствия применения / А. В. Иванова // Стратегические решения и риск-менеджмент. 2018. № 3. С. 88–107. <https://doi.org/10.17747/2078-8886-2018-3-88-107>.
10. Шевчук, М. В. Проектирование образовательного процесса на основе технологии виртуальной реальности / М. В. Шевчук, В. Г. Шевченко, А. А. Зорина // Информатика в школе. 2020. № 10. С. 19–31.
11. Введение в физику нанотехнологии / В. В. Беляев [и др.]. М.: Гос. ун-т просвещ., 2024. ISBN 978-5-7017-3461-4.
12. Быков, В. А. Нанотехнологии в современной науке: фестиваль науки МГОУ / В. А. Быков // Нанотехнологическое общество России и группа компаний «НТ-МДТ Spectrum Instruments». М., 2017.
13. Быков, В. А. Зондовая микроскопия и спектроскопия: приборы и методы для комплексного анализа поверхностных структур / В. А. Быков, В. В. Поляков // Нанотехнологии: Образование, Наука, Инновации: сб. ст. X Всерос. науч.-практ. конф. Курск: Курский государственный университет, 2019. С. 17–18.
14. Тодуа, П. Метрология и стандартизация в нанотехнологиях / П. Тодуа // Фотоника. 2010. № 1. С. 2–8.
15. Time-of-Flight Secondary Ion Mass Spectrometry Analyses of Vancomycin / L. Du [et al.] // Biointerphases. 2018. Vol. 13, No 3. <https://doi.org/10.1116/1.5016186>.
16. Новые задачи физико-математического практикума. Часть II. Тестирование качества сближения устройства спасения космонавта с международной космической станцией / В. В. Александров [и др.]. М.: Изд-во попеч. совета мех.-матем. ф-та МГУ, 2015.
17. Хребтова, С. Б. Дополненная реальность в обучении: наглядное и понятийное в демонстрации моделей молекул / С. Б. Хребтова, Е. В. Высоцкая, В. В. Миняйлов // Давыдовские чтения: сб. тез. участников II Междунар. науч.-практ. конф., 12–13 сент. 2022 г. М.: ФГБОУ ВО МГППУ, 2022. С. 275–278.
18. Примеры моделей кристаллических структур [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://p3d.in/u/crystal3d>. Дата доступа: 22.03.2025.

Поступила 16.01.2025

Принята в печать 28.03.2025

Доступна на сайте 10.07.2025

References

1. Belyaev V. V. (2014) Immersion into Superreality. Based on the Results of the SID 2014 Symposium. *Electronics: Science, Technology, Business*. (6), 32–44 (in Russian).
2. Belyaev V. V., Suarez D. (2017) Displays for Military Applications: Industry Specifics, Modern Technologies and Development Vector. *Electronics: Science, Technology, Business*. (6), 52–63. <https://doi.org/10.22184/1992-4178.2017.166.6.52.63> (in Russian).
3. Huang A. (2019) Teaching, Learning, and Assessment with Virtualization Technology. *Journal of Educational Technology Systems*. 47 (4), 523–538. <https://doi.org/10.1177/0047239518812707>.
4. Ray S., Srivastav S. (2020) Virtualization of Science Education: A Lesson from the COVID-19 Pandemic. *Journal of Proteins and Proteomics*. 11, 77–80. <https://doi.org/10.1007/s42485-020-00038-7>.
5. Annappaiah D. H., Agrawal V. K. (2011) Virtualization Technologies and Techniques in Education Learning Applications. *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 59, 1824–1829.
6. Klement M. (2017) Models of Integration of Virtualization in Education: Virtualization Technology and Possibilities of Its Use in Education. *Computers & Education*. 105, 31–43. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2016.11.006>.
7. LaValle S. M. (2023) *Virtual Reality*. UK, Cambridge University Press & Assessment Publ.
8. Aukstakalnis S. (2016) *Practical Augmented Reality: A Guide to the Technologies, Applications, and Human Factors for AR and VR (Usability)*. USA, Addison-Wesley Professional Publ.
9. Ivanova A. V. (2018) VR & AR Technologies: Opportunities and Application Obstacles. *Strategic Decisions and Risk Management*. (3), 88–107. <https://doi.org/10.17747/2078-8886-2018-3-88-107> (in Russian).
10. Shevchuk M. V., Shevchenko V. G., Zorina A. A. (2020) Designing the Educational Process Based on Virtual Reality Technology. *Informatics at School*. (10), 19–31 (in Russian).
11. Belyaev V. V., Chaurov D. N., Kurilov A. D., Burdanova M. G., Zverev N. V. (2024) *Introduction to Nanotechnology Physics: A Methodological Guide for Laboratory and Practical Work*. Moscow, State University of Education. ISBN 978-5-7017-3461-4 (in Russian).

12. Bykov V. A. (2017) Nanotechnology in Modern Science: Science Festival MRSU. *Nanotechnology Society of Russia and "NT-MDT Spectrum Instruments" Group of Companies*. Moscow (in Russian).
13. Bykov V. A., Polyakov V. V. (2019) Probe Microscopy and Spectroscopy: Instruments and Methods for Comprehensive Analysis of Surface Structures. *Nanotechnology: Education, Science, Innovation: Proceedings of the X All-Russian Scientific and Practical Conference*. Kursk, Kursk State University. 17–18 (in Russian).
14. Todua P. (2010) Metrology and Standardization in Nanotechnology. *Photonics*. (1), 2–8 (in Russian).
15. Lin Du, Xiaohui Yang, Wenqiang Li, Haoying Li, Shanbao Feng, Rong Zeng, et al. (2018) Time-of-Flight Secondary Ion Mass Spectrometry Analyses of Vancomycin. *Biointerphases*. 13 (3). <https://doi.org/10.1116/1.5016186>.
16. Aleksandrov V. V., Bugrov D. I., Kruchinina A. P., Lebedev A. V., Lemak S. S., Tikhonova K. V., et al. (2015) *New Problems of the Physical and Mathematical Practicum. Part II. Testing the Quality of Approach of the Cosmonaut Rescue Device to the International Space Station*. Moscow, Publishing House of the Board of Trustees of the Faculty of Mechanics and Mathematics of Moscow State University (in Russian).
17. Khrebtova S. B., Vysotskaya E. V., Minyaylov V. V. (2022) Augmented Reality in Education: Visual and Conceptual in Demonstrating Molecular Models. *Davydov Readings, Collection of Abstracts of Participants of the II International Scientific and Practical Conference, Sept. 12–13*. Moscow, MSUPE. 275–278 (in Russian).
18. *Examples of Crystal Structure Models*. Available: <https://p3d.in/u/crystal3d> (Accessed 22 March 2025) (in Russian).

Received: 16 January 2025

Accepted: 28 March 2025

Available on the website: 10 July 2025

Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Беляев В. В., д-р техн. наук, проф., Государственный университет просвещения, Российский университет дружбы народов

Грань Т. Н., канд. пед. наук, доц., Государственный университет просвещения

Зорина А. А., школа № 760 имени А. П. Маресьева

Костякова В. Г., канд. пед. наук, доц., Государственный университет просвещения

Шевчук М. В., канд. физ.-мат. наук, доц., Государственный университет просвещения

Миняйлов В. В., канд. хим. наук, доц., Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова (МГУ)

Чертополохов В. А., канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., МГУ

Адрес для корреспонденции

105005, Российская Федерация,
Москва, ул. Радио, 10А
Государственный университет просвещения
Тел.: +7 495 780-09-43
E-mail: vic_belyaev@mail.ru
Беляев Виктор Васильевич

Information about the authors

Belyaev V. V., Dr. Sci. (Tech.), Professor, State University of Education, RUDN University

Gran T. N., Cand. Sci. (Ped.), Associate Professor, State University of Education

Zorina A. A., School No 760 named after A. P. Maresyev

Kostyakova V. G., Cand. Sci. (Ped.), Associate Professor, State University of Education

Shevchuk M. V., Cand. Sci. (Phys. and Math.), Associate Professor, State University of Education

Minyailov V. V., Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor, Lomonosov Moscow State University (LMSU)

Chertopolokhov V. A., Cand. Sci. (Phys. and Math.), Senior Researcher, LMSU

Address for correspondence

105005, Russian Federation,
Moscow, Radio St., 10A
State University of Education
Tel.: +7 495 780-09-43
E-mail: vic_belyaev@mail.ru
Belyaev Victor Vasilievich