

УДК 004.92

DOI: 10.12737/2308-4898-2024-12-3-21-31

С.А. Чупин

Канд. техн. наук, доцент,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы
Екатерины II,
Россия, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров,
21-1 линия, д. 2

А.И. Исаев

Канд. техн. наук, доцент,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы
Екатерины II,
Россия, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров,
21-1 линия, д. 2

О.В. Трубецкая

Канд. техн. наук, доцент,
Санкт-Петербургский горный университет императрицы
Екатерины II,
Россия, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров,
21-1 линия, д. 2

Применение дополненной реальности при преподавании инженерной горно-геологической графики

Аннотация. В современном обществе, с его возрастающим потреблением природных ресурсов, существует необходимость в высококвалифицированных специалистах, особенно в горной промышленности. Одним из вызовов в подготовке таких специалистов является сложность восприятия и изучения горно-геологических процессов, а также инженерной и компьютерной графики. Для повышения эффективности обучения, особенно на начальных курсах, актуальным становится использование цифровых технологий, таких как дополненная реальность (AR), которая способствует улучшению визуального восприятия учебного материала и повышению интереса студентов.

Данный подход уже активно применяется в различных отраслях, включая промышленность и образование, где AR улучшает визуальное и контекстуальное обучение, что способствует увеличению запоминаемости материала на 25–80%. Применение AR-технологий в обучении инженерной графике и начертательной геометрии позволяет студентам лучше воспринимать сложные трехмерные структуры и горные выработки, особенно в условиях ограниченной практики и недостаточной подготовки в черчении. Это дает возможность наглядно представить процессы, которые сложно воспринимать на обычных двумерных чертежах.

Основное внимание уделяется анализу различных платформ и инструментов для разработки AR-приложений, таких как *Unity*, *Unreal Engine*, *ARKit*, *ARCore* и *WebXR*. В статье рассматриваются преимущества и недостатки этих технологий в контексте применения для образовательных целей, а также создание AR-приложений, направленных на улучшение восприятия и изучение горно-геологических объектов и процессов. Приводится приложение, разработанное на платформе *Unity*, позволяющее рассматривать три варианта выработок:

однопутевые, двухпутевые и трехпутевые. Результаты опроса студентов, использовавших данное приложение, показывают, что AR-приложения значительно повышают визуальную привлекательность и понимание учебного материала, улучшая пространственное восприятие и усвоение сложных графических элементов.

Ключевые слова: дополненная реальность, горно-геологическая графика, *Unity*, чертежи, горные выработки.

S.A. Chupin

Ph. D. of Engineering, Associate Professor,
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University,
2, 21st Line, Vasilievsky Island, St. Petersburg, 199106, Russia

A.I. Isaev

Ph. D. of Engineering, Associate Professor,
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University,
2, 21st Line, Vasilievsky Island, St. Petersburg, 199106, Russia

O.V. Trubetskaya

Ph. D. of Engineering, Associate Professor,
Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University,
2, 21st Line, Vasilievsky Island, St. Petersburg, 199106, Russia

Application of Augmented Reality in Teaching Mining and Geological Graphics

Abstract. In modern society, with its growing consumption of natural resources, there is a need for highly qualified specialists, especially in the mining industry. One of the challenges in training such specialists is the complexity of perceiving and studying mining and geological processes, as well as engineering and computer graphics. To improve the effectiveness of education, especially in the early years, the use of digital technologies such as augmented reality (AR) becomes crucial, as it enhances visual perception of educational material and increases student engagement.

This approach is already being actively applied in various industries, including manufacturing and education, where AR improves visual and contextual learning, contributing to a 25–80% increase in material retention. The use of AR technologies in teaching engineering graphics and descriptive geometry helps students better understand complex 3D structures and mining workings, especially in conditions of limited hands-on experience and insufficient knowledge of drafting. It enables a clear visualization of processes that are difficult to grasp through conventional 2D drawings.

The paper focuses on the analysis of various platforms and tools for developing AR applications, such as *Unity*, *Unreal Engine*, *ARKit*, *ARCore*, and *WebXR*. The article discusses the advantages and disadvantages of these technologies in the context of educational applications and the creation of AR applications aimed at enhancing the perception and study of mining and geological objects and processes. An application developed on the *Unity* platform is presented, allowing users to explore three types of mining workings: single-track, double-track, and triple-track. Survey results from students using this application show that AR applications significantly enhance the visual appeal and understanding of educational material, improving spatial perception and the assimilation of complex graphic elements.

Keywords: augmented reality, mining and geological graphics, *Unity*, drawings, mine workings.

Введение

Развитие современного общества требует большого количества природных ресурсов. По данным ООН с 1990 г. добыча природных ресурсов увеличилась более чем в 2 раза и может снова удвоиться к 2060 г. Так добыча природного газа в России с 2010 г. увеличилась на 17% (с 657 млрд м³ до 791 млрд м³) [5]. Потребление же угля промышленными предприятиями в России с 2010 г. увеличилось на 65% [21]. Таким образом, поддержание современных темпов развития горной промышленности невозможно без применения современных технологий и высококвалифицированных специалистов. Острота проблемы в преподавании дисциплин как в России, так и за рубежом, связанных с инженерной и компьютерной графикой, все чаще выносится на обсуждение в научных кругах [4; 9; 11]. На данный момент, в Российской Федерации, подготовка специалистов горной отрасли проводится в ряде вузов среди которых ведущее место занимает Санкт-Петербургский горный университет. Специфика горного образования связана со сложными технологическими и техническими процессами, протекающими при добыче и переработке минеральных ресурсов. Зачастую, студентам не представляется возможности изучить или увидеть горнорудные предприятия и применяемое оборудование. Для облегчения восприятия преподаваемого материала и увеличения заинтересованности студентов, особенно начальных курсов, необходимо использование цифровых технологий, таких как дополненная реальность (AR), виртуальная реальность (VR), тренажеры-симуляторы, 3D-визуализация и др.

В настоящее время широкое распространение получили AR-технологии, применение которых облегчило с появлением и удешевлением личных смартфонов. На данный момент эти технологии используются в различных отраслях и сферах деятельности человека, начиная с продажи товаров и заканчивая медициной. Так применение AR-технологий при демонстрации объектов культурного значения увеличивает информативность и привлекательность выставок экспозиций [15; 31]. Промышленность также все чаще прибегает к этим технологиям для увеличения интерактивности информативности происходящих процессов, пуске и наладке оборудования, обучения персонала и др. [23; 24; 33]. В системе образования данные технологии используются на всех уровнях, начиная с дошкольного [14; 29] и заканчивая высшим, включая машиностроительные [27; 28] или архитектурные направленности [22; 33]. По данным [19], к 2023 г. ожидается увеличение активных пользователей мобильных приложений дополненной реальности до 2,4 млрд, при этом в 2015 г. таких пользователей было порядка 200 млн.

Согласно исследованиям [1; 2] было выявлено, что AR улучшают визуальное и контекстуальное обучение, увеличивая информативность изучаемого материала. При этом запоминаемость материала увеличивается с 25% до 80% по сравнению с традиционными способами обучения (классические занятия и лекции, чтение текста). Опросы студентов технических [18] и нетехнических специальностей [20], проведенные после занятий с использованием AR-технологий, показали высокую мотивированность студентов к изучению нового материала. В работе [17] авторы сравнивали различные приемы сборочных операций при использовании AR: текст, видео и анимация. Было установлено, что наименее эффективным способом преподнесения информации является текст, а наиболее эффективным — анимация. К тому же эффективность анимации рассматривается и при преподавании «Начертательной геометрии» [12].

Применение приложений дополненной реальности при преподавании графических дисциплин, таких как начертательная геометрия, инженерная графика, компьютерная графика, еще не так распространено. Так, авторы работы [6], проанализировав научные статьи с 2005 по 2020 г., установили, что в настоящее время, несмотря на большую популярность AR-технологий, отсутствует достаточное количество программ и учебных материалов по дисциплине «Инженерная и компьютерная графика». Ряд авторов внедрили технологии дополненной реальности в учебные материалы по начертательной геометрии в российских [3; 7] и зарубежных вузах [16; 25], инженерной машиностроительной [8; 10; 32] и строительной графике [30].

Отсутствие во многих школах черчения и должной подготовки геометрии негативно сказывается на пространственном восприятии обучающихся начальных курсов. Острота проблемы как в России, так и за рубежом в преподавании дисциплин, связанных с инженерной и компьютерной графикой, все чаще выносится на обсуждение в научных кругах [4; 9; 11]. Для улучшения усвоения материала по дисциплинам графического направления требуется применение различных дополнительных инструментов, таких как AR и VR. В Санкт-Петербургском горном университете, помимо классических курсов начертательной геометрии и инженерной графики, преподается и узконаправленная горно-геологическая графика. Данный курс направлен на получение знаний в области построения и оформления горных чертежей, работы с проекциями с числовыми отметками. При построении горных чертежей студенты сталкиваются и с изображениями различных типов выработок, окрестволовых дворов, залегания полезного иско-

паемого и др. Отсутствие знаний у студентов начальных курсов в области горного дела в совокупности со слабой подготовкой в области черчения и геометрии осложняет еще в большей степени выполнение заданий. В результате в большинстве случаев все сводится к неосознанному «перерисовыванию» задания. Ввиду этого при преподавании таких дисциплин следует использовать, наряду с другими, когнитивно-визуальный подход, который основывается на усвоении знаний в результате визуального мышления. Таким средством могут быть приложения дополненной реальности.

Обзор приложений дополненной реальности

С развитием технологий и увеличением интереса к дополненной реальности появились многочисленные платформы и инструменты для создания *AR*-приложений. Эти инструменты можно условно разделить на три категории: платформы для разработки мобильных приложений, веб-инструменты *AR* и *AR SDK* (наборы инструментов для разработки). Основные особенности, преимущества и недостатки следующие.

1. Платформы для разработки мобильных приложений

Unity — один из самых популярных систем для разработки *AR*-приложений, используемый для кроссплатформенной разработки. *Unity* предоставляет мощные функции, возможность использования системы визуального скриптинга (*blueprints*) и активное сообщество. Однако её недостатками являются высокие требования к ресурсам, сложности с оптимизацией памяти, а также отсутствие встроенного контроля версий.

Unreal Engine — высокопроизводительная система, предназначенная для сложных *AR*-приложений, особенно в играх и симуляциях. Её преимущество заключается в удобной системе *blueprints*, однако высокая сложность обучения, требования к аппаратному обеспечению и проблемы с оптимизацией для мобильных платформ являются значительными недостатками.

React Native — популярная платформа для создания кроссплатформенных мобильных приложений. Подходит для простых *AR*-приложений, легко интегрируется с другими сервисами, но имеет ограниченные возможности по производительности и функционалу.

*2. Веб-инструменты *AR**

WebXR — открытый стандарт для разработки *AR*-приложений прямо в веб-браузере, без необходимости установки дополнительных приложений. Это удобный инструмент для создания *3D*-изображений

и *AR*-дополнений, однако ввиду того, что разработка платформы ведется всего несколько лет, платформа имеет ряд недостатков, таких как несовместимость с некоторыми *Web*-браузерами и низкой производительностью на мобильных устройствах.

Three.js — популярная *JavaScript*-библиотека для создания *3D*-графики и анимации в браузере. Она гибка и имеет большое количество готовых библиотек и решений, но требует хороших знаний *JavaScript* и *3D*-концепций. Присутствуют проблемы с производительностью на старых устройствах и отсутствие встроенных механик физики и столкновений ограничивают её возможности для сложных проектов.

Augment — веб-платформа, предлагающая визуальные сценарии для быстрого создания *AR*-приложений. Это идеальный инструмент для начинающих пользователей, но его функциональные возможности ограничены, что приводит к невозможности использования на сложных проектах.

3. AR SDK и наборы инструментов

ARKit (iOS) — набор инструментов от *Apple* для разработки *AR*-приложений на устройствах *iOS*. Он интегрирован с операционной системой и использует возможности датчиков *Apple* для достижения высокой производительности. Недостатками являются ограниченность использования — только на устройствах *Apple* — и высокая стоимость разработки.

ARCore (Android) — аналог *ARKit* от *Google* для *Android*-устройств. Он поддерживает широкий спектр устройств и предлагает простоту в освоении, но его возможности отслеживания и производительность могут варьироваться в зависимости от устройства.

Vuforia — одна из самых популярных платформ для *AR*, поддерживающая кроссплатформенность и облачные технологии. Она идеально подходит для сложных проектов, но требует значительных затрат на лицензию и может столкнуться с проблемами производительности на старых устройствах.

Wikitude — ещё один кроссплатформенный *SDK*, предлагающий функциональные возможности для создания *AR*-приложений, включая распознавание объектов и геолокацию. Это удобный инструмент для начинающих разработчиков, но требует дополнительных усилий для реализации сложных функций.

Платформы и инструменты для разработки *AR*-приложений продолжают развиваться, каждая из них имеет свои сильные и слабые стороны. *Unity* и *Unreal Engine* подходят для сложных и ресурсоёмких проектов, тогда как *React Native* и веб-инструменты, такие как *WebXR* и *Three.js*, хороши для более простых и кроссплатформенных решений. Выбор подходящего инструмента зависит от специфики проекта, уровня подготовки разработчиков и целей бизнеса.

Приложение дополненной реальности

Методология разработки приложения дополненной реальности (*AR*) включала в себя системный подход, охватывающий различные этапы, а также планирование, создание контента, разработку программного обеспечения, тестирование и оценку пользователей. Методология, изложенная ниже, представляет собой комплексное руководство по ключевым шагам, предпринимаемым в процессе разработки.

Цели

При выполнении расчетно-графического задания по горно-геологической графике у студентов наиболее часто возникают трудности для понимания изображений в задании «Околоствольный двор». Данное задание представляет собой план расположения железнодорожных путей, стрелочных переводов, стволов, приемно-разгрузочных бункеров околоствольного двора и сечение горной выработки (рис. 1).

Сечение горных выработок выполняются с использованием некоторых допущений и условных обозначений (вагонетка, контактный провод, рельсы,

шпалы, водоотливная канавка) на плоском чертеже, что усложняет восприятие обучающимися студентами изображения (рис. 2). Целью данного исследования было улучшение восприятия преподносимого материала. Решить такую задачу можно, изобразив трехмерную модель выработки в методических указаниях к выполнению задания или применив приложения дополненной реальности. Преимуществом приложения будет возможность рассмотреть участок горной выработки с разных сторон и «заглянуть» внутрь. Текстуры, отображаемые на моделях в приложении, будут отражать максимально реалистично модель выработки.

Трехмерное изображение модели выработки

Изображения трехмерной модели выработки, обычно, строится на основе созданной заранее трехмерной модели. Трехмерная модель может быть построена как в CAD-системах (Компас 3D, Autodesk Inventor, SolidWorks и др.), так и в графических си-

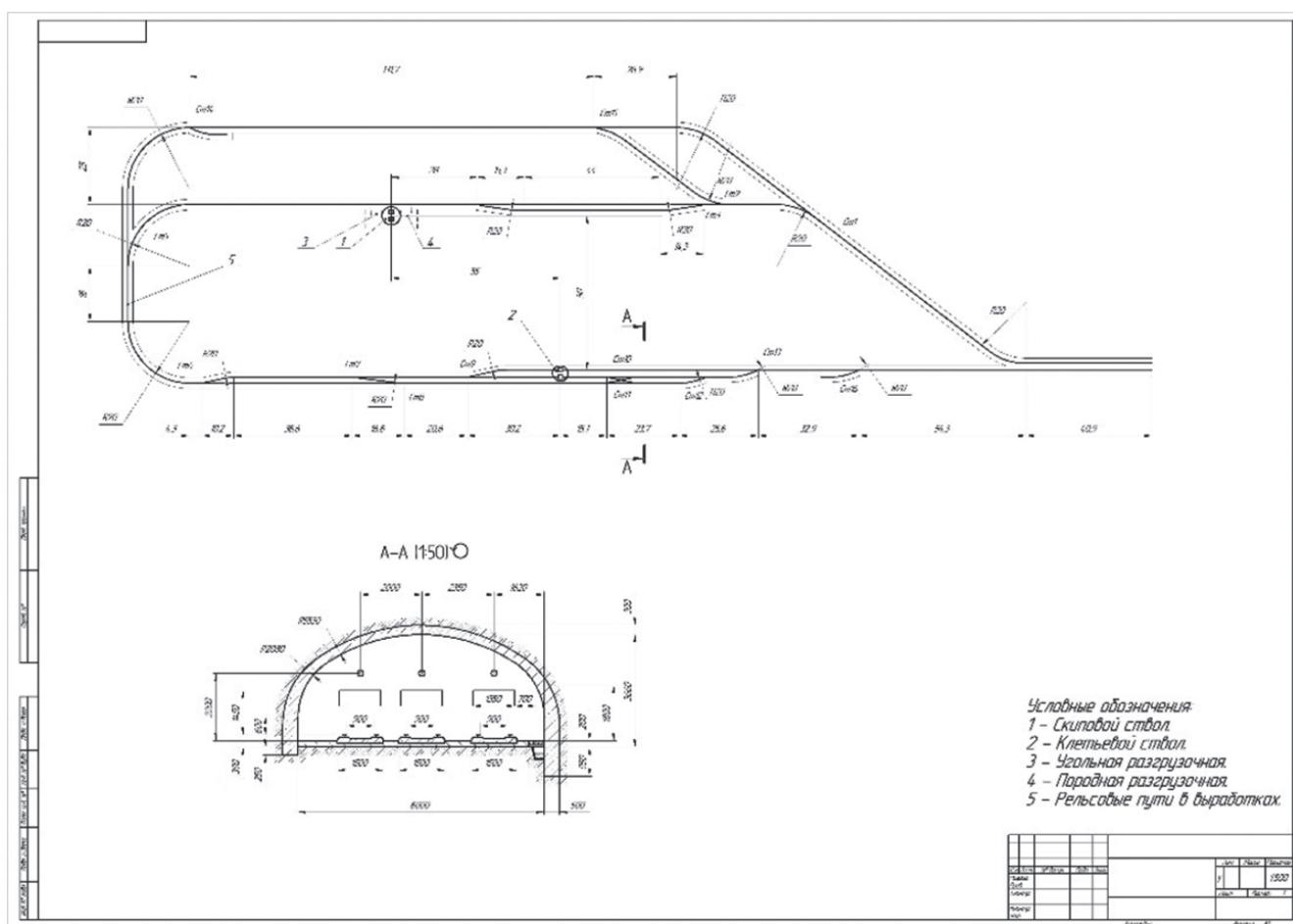


Рис. 1. Пример задания «Околоствольный двор» [составлено авторами]

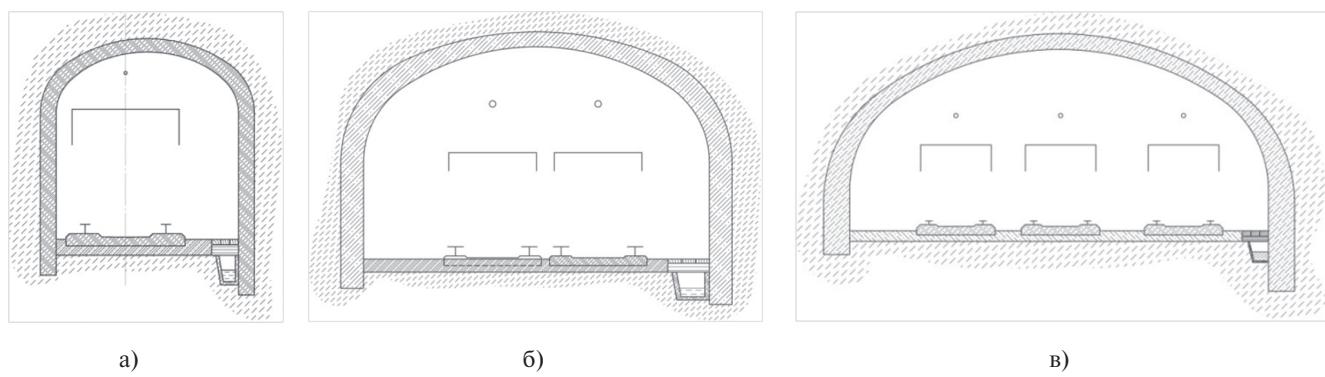


Рис. 2. Сечения однопутевой (а), двухпутевой (б), трехпутевой (в) выработок [составлено авторами]

стемах (*Autodesk 3ds Max*, *Autodesk Maya*, *Blender* и др.) [33]. Модели, полученные в *CAD*-системах, могут быть сразу преобразованы в аксонометрические проекции и сохранены в виде изображения. Для улучшения наглядности и реалистичности моделям придается определенная цветовая палитра и в некоторых случаях текстуры (рис. 3, а). Далее, в зависимости от возможности программного комплекса, модель сохраняется в определенном пространственном положении в формате изображения (*.jpg*, *.png*, *.tiff* и др.). При возможности наложения реалистичных текстур, окружения и освещенности изображение трехмерной модели получается в результате рендеринга, в таком варианте изображение смотрится наиболее реалистично (рис. 3, б).

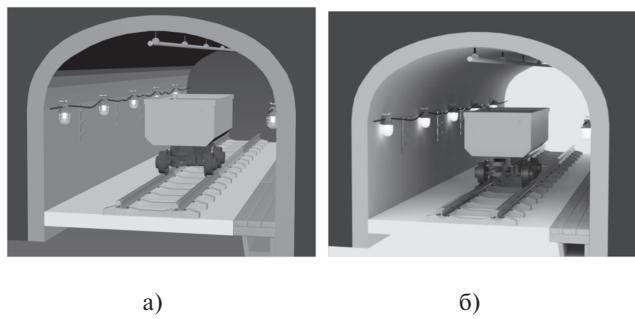


Рис. 3. Изображения выработок: а) трехмерная модель с цветовой палитрой; б) реалистичная визуализация [составлено авторами]

Выбор инструмента и технологии

Выбор программного обеспечения: *Unity 3D* была выбрана в качестве основной платформы разработки из-за наличия большого количества обучающего материала и бесплатной лицензии для создания некоммерческих *AR*-приложений.

Требования к оборудованию: приложение ориентировано на мобильные устройства с операционной системой *Android*, поэтому необходимо учитывать их возможности и ограничения.

Языки программирования: разработка осуществлялась с использованием *C#* в среде разработки *Unity*.

Создание объектов

В приложениях дополненной реальности обычно используются трехмерные модели, заранее созданные в программах для трехмерного моделирования (рис. 3). В данном варианте используются оптимизированные модели ранее созданных выработок. Оптимизация *3D*-модели заключается в снижении общего количества полигонов, так как для реалистичной визуализации обычно строится выпуклополигональная модель. Такие модели непригодны для использования в *AR*-приложениях, так как увеличивают нагрузку на оборудование, в результате происходит «зависание» *3D*-модели при отображении. Плавность и скорость отображения модели на различных устройствах может отличаться ввиду разных технических характеристик применяемых устройств.

Создание маркеров. Отличительные маркеры были разработаны в качестве визуальных триггеров для размещения модели. В качестве маркеров использовались сечения однопутевой, двухпутевой, трехпутевой горной выработки (см. рис. 2).

Разработка AR-приложения

Интеграция *AR Foundation*. Платформа *AR Foundation Unity* была использована для облегчения кросс-платформенной разработки, позволяя приложению беспрепятственно работать как на устройствах *iOS*, так и на *Android*. Окно настройки в *Unity* представлено на рис. 4.

Реализация интуитивно понятного взаимодействия с пользователем имела решающее значение для повышения удобства использования приложения. Система ввода *Unity* использовалась для обработки жестов, касаний и других пользовательских действий. Например, жесты сжатия использовались для масштабирования *3D*-моделей (рис. 5).

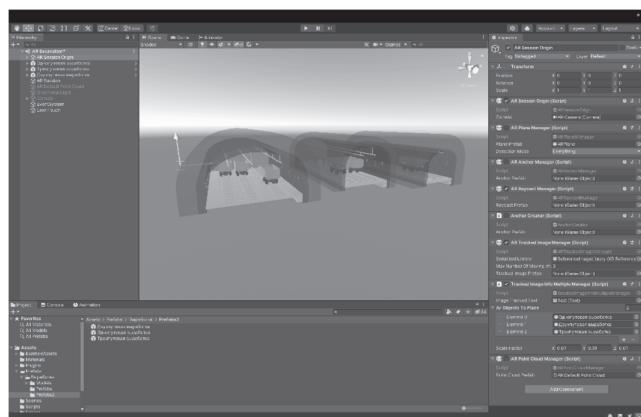


Рис. 4. Настройка отображения однопутевой, двухпутевой и трехпутевой выработок в *Unity* [составлено авторами]

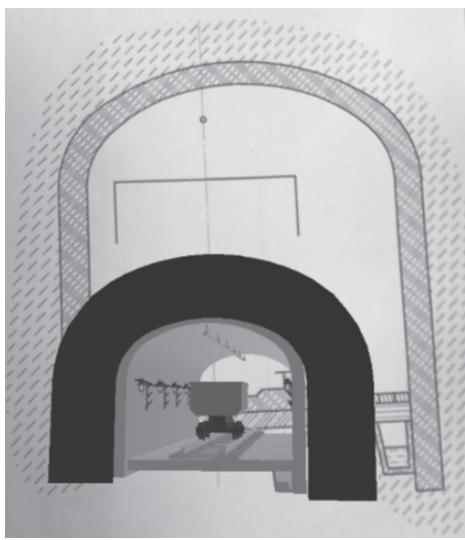


Рис. 5. Отображение модели однопутевой выработки в приложении [составлено авторами]

Интерфейс приложения был разработан с акцентом на интуитивность и удобство использования для студентов. Основные разделы приложения включают в себя модель, стиль отображения, масштабирование, пояснения.

Раздел «Модель» позволяет скрывать различные компоненты модели, например, для детального рассмотрения. Стиль отображения позволяет просматривать модель в упрощенной визуализации и режиме полупрозрачности скальной породы и бетонной крепи. Для реализации изучения отдельных компонентов модели был использован прием удерживания пальцем, в результате модель переходит в полупрозрачный режим отображения скальной породы и бетонной крепи (рис. 6).

К сожалению, при тестировании приложения полноценно воспользоваться функциями смогли

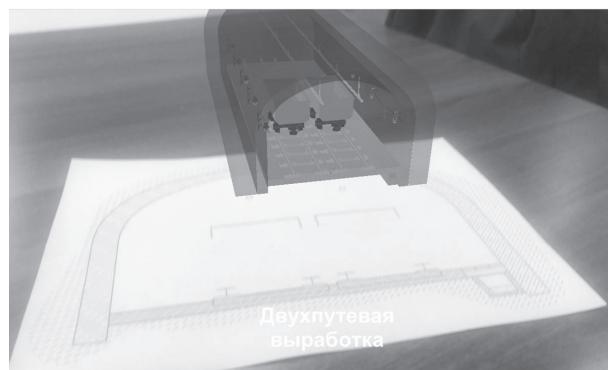


Рис. 6. Режим полупрозрачности скальной породы и бетонной крепи двухпутевой выработки [составлено авторами]

пользователи *Android*-устройств, пользователи *iOS* использовали для тестирования приложение, установленное на устройстве преподавателя или устройства с *Android* других студентов. Такое неудобство вызвано сложностью загрузки приложений в магазин приложений *Apple — AppStore*. Для загрузки требуется права разработчика приложений и ежегодные денежные взносы.

Оценка и тестирование

Оценка наглядности моделей в приложениях дополненной реальности (*AR*) и их сравнение с двумерными чертежами (рисунками) может включать различные методы. Например, оценка визуальной привлекательности, оценка эффективности обучения, оценка интерактивности и др. В данном исследовании в качестве метода будет использован метод визуальной привлекательности. Такой подход необходим для дальнейшей доработки приложения. Для оценки студентам предлагалось заполнить анкету, состоящую из шести вопросов.

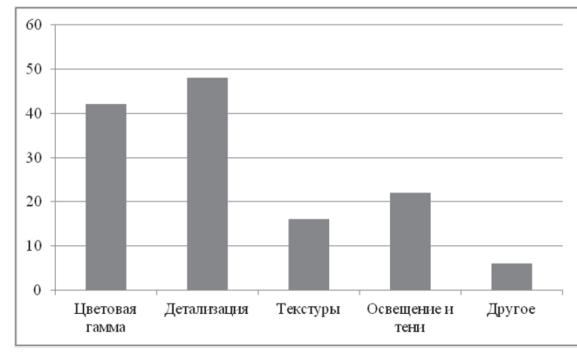
1. Оцените визуальную привлекательность модели в *AR* и в виде двумерного чертежа от 1 до 10, где 1 — совсем не привлекательно, 10 — очень привлекательно.
2. Какие аспекты визуального представления вам больше нравятся в *AR*-модели? (Выберите все подходящие варианты: цветовая гамма, детализация, текстуры, освещение и тени).
3. Какие аспекты визуального представления вам больше нравятся в двумерных изображениях? (Выберите все подходящие варианты: цветовая гамма, детализация, четкость линий, простота восприятий, укажите свой вариант).
4. Насколько хорошо *AR*-модель передает пространственные аспекты конструкции по сравнению с двумерным чертежом? (Очень хорошо; хорошо; удовлетворительно; плохо; очень плохо).

5. Какие преимущества вы видите в использовании двумерных чертежей по сравнению с AR-моделями? (Простота восприятия; доступность получения информации; большая ясность в представлении деталей; меньшее потребление ресурсов устройства; другое (укажите)).
 6. Укажите дополнительные комментарии или предложения по улучшению визуального представления инженерных объектов и конструкций в AR-приложениях.
- Опрос проводился в двух группах одного направления и одного года поступления. Количество опрошенных — 50 человек.

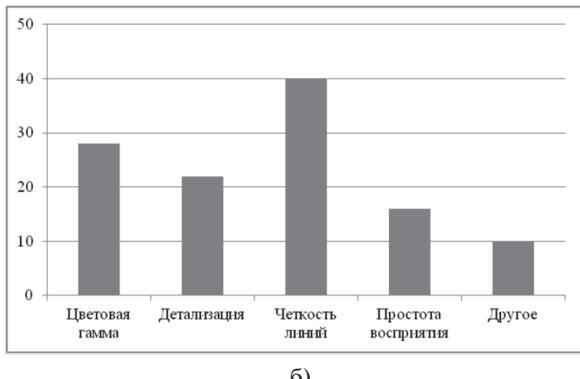
Результаты

Обработка результатов опроса показала, что модели горной выработки, показанные в приложении дополненной реальности, более привлекательны с визуальной точки зрения, и средняя оценка опрошенных составляла 7,5 против 5,8 для двумерных чертежей.

Большинство опрошенных считает наиболее привлекательным в AR-моделях цветовую гамму и детализацию, а в двумерных чертежах — четкость линий (рис. 7). Такие результаты очевидны ввиду большей наглядности и интерактивности трехмерных объектов.



a)



б)

Рис. 7. Аспекты визуального представления AR-модели (а), двумерного чертежа (б) [составлено авторами]

При оценке визуального представления объектов AR-модели и двумерных чертежей мнения опрошенных разделились. Так, почти 30% опрошенных оце-

нили визуальное представление на оценку «очень хорошо» и «хорошо», что показывает положительную тенденцию восприятия объектов AR. Около 40% студентов высказались, в пользу оценок «плохо» и «очень плохо». Такие оценки вызваны проблемами, связанными с недостаточной детализацией объектов, с трекингом и другими техническими проблемами. Удовлетворительную оценку выставили порядка 30%, это может означать, что AR предоставляет базовое представление о пространственной структуре, но есть место для улучшений.

Опрошенные отметили, что преимуществом в использовании двумерных чертежей является более ясное представление деталей конструкции, четкость линий и подробная аннотация могут облегчить понимание структуры и функций элементов. Для некоторых участников двумерные чертежи могут быть более простыми для восприятия и понимания. Они представляют плоское, двухмерное представление конструкции, что может быть более интуитивным для определенных пользователей. В некоторых ситуациях, таких как работа в ограниченных освещенных или шумных условиях, двумерные чертежи могут быть более надежным и удобным вариантом, поскольку они не зависят от внешних факторов, которые могут влиять на работу AR-приложений.

В качестве предложений по улучшению приложения было заявлено увеличение детализации моделей, что может значительно повысить реализм и понимание конструкции. Такой результат может быть достигнут путем улучшения текстур, добавления дополнительных деталей. Также было отмечено, что добавление анимации в AR-модели может помочь визуализировать движение и функционирование конструкций. Это особенно полезно для демонстрации работы механизмов и систем.

Заключение

В результате работы были проанализированы различные приложения и сервисы по созданию AR-приложений. Наиболее оптимальным решением по созданию приложений оказалось приложение на базе *Unity*.

На основе работы по горно-геологической графике — околосвольный двор — было создано приложение для визуализации в дополненной реальности горных выработок различного сечения.

Визуальное представление инженерных объектов и конструкций в AR-приложениях имеет большой потенциал, который может быть реализован с помощью улучшения детализации, оптимизации моделей и поддержки интерактивности. Понимание предпочтений и потребностей пользователей, а также постоянное развитие технологий AR будет ключевым в обеспечении высокого качества визуального представления в будущем.

Литература

1. Аверьянов В.В. Книги с дополненной реальностью как эффективный образовательный инструмент [Текст] / В.В. Аверьянов, Д.И. Троицкий // Виртуальная и дополненная реальность-2016: состояние и перспективы: сб. научно-методических материалов, тезисов и статей конференции / под общ. ред. Д.И. Попова. — М.: Изд-во ГПБОУ МГОК, 2016. — С. 7–11.
2. Арсентьев Д.А. Внедрение элементов дополненной реальности в учебно-методическую литературу [Текст] / Д.А. Арсентьев // В сб.: Университетская книга: традиции современность материалы научно-практической конференции. — 2015. — С. 18–22.
3. Белова О.П. Применение технологии дополненной реальности для графической визуализации учебных задач пространственной геометрии [Текст] / О.П. Белова, А.А. Казнин // Концепт. — 2017. — Т. 39. — С. 3521–3525. — URL: <https://e-koncept.ru/2017/971031.htm> (дата обращения: 03.12.2024).
4. Бойков А.А. Проблемы геометро-графической подготовки студентов ВУЗов [Текст] / А.А. Бойков, К.Т. Егизарян, А.В. Ефремов, Н.С. Кадыкова // Геометрия и графика. — 2023. — Т. 11. — № 1. — С. 4–22. — DOI: 10.12737/2308-4898-2023-11-1-4-22
5. Данные по мировой энергетике и климате [Электронный ресурс]. — URL: <https://yearbook.enerdata.ru> (дата обращения: 20.11.2024).
6. Игнатьев С.А. Обзор образовательных курсов на основе технологий дополненной реальности [Текст] / С.А. Игнатьев, З.О. Третьякова, М.В. Воронина // Геометрия и графика. — 2020. — Т. 8. — № 3. — С. 67–86. — DOI: 10.12737/2308-4898-2020-67-86
7. Игнатьев С.А. Дополненная реальность в начертательной геометрии [Текст] / С.А. Игнатьев, З.О. Третьякова, М.В. Воронина // Геометрия и графика. — 2020. — Т. 8. — № 2. — С. 41–50. — DOI: doi.org/10.12737/2308-4898-2020-41-50
8. Игнатьев С.А. Технологии дополненной реальности в проектной деятельности студентов [Текст] / С.А. Игнатьев, З.О. Третьякова, М.В. Воронина // Геометрия и графика. — 2020. — Т. 8. — № 2. — С. 51–57. — DOI: 10.12737/2308-4898-2020-51-57
9. Козлова И.А. Графические дисциплины и информатизация инженерного образования [Текст] / И.А. Козлова, Р.Б. Славин, Б.М. Славин // Геометрия и графика. — 2022. — Т. 10. — № 4. — С. 35–45. — DOI: 10.12737/2308-4898-2022-10-4-35-45
10. Мусаева Т.В. Технологии дополненной реальности в проектной деятельности студентов [Текст] / Т.В. Мусаева, А.А. Ураго // Геометрия и графика. — 2021. — Т. 9. — № 2. — С. 46–55. — DOI: 10.12737/2308-4898-2021-9-2-46-55
11. Оюунжаргал Ч. Тенденции обучения в инженерной графике [Текст] / Ч. Оюунжаргал, Э. Оюунзаяа // Геометрия и графика. — 2022. — Т. 10. — № 2. — С. 53–59. — DOI: 10.12737/2308-4898-2022-10-2-53-59
12. Палий Н.В. Покадровая анимация в обучении начертательной геометрии [Текст] / Н.В. Палий // Геометрия и графика. — 2023. — Т. 11. — № 3. — С. 39–47. — DOI: 10.12737/2308-4898-2023-11-3-39-47
13. Славин Р.Б. Разработка системы полуавтоматического моделирования трехмерных изображений [Текст] / Р.Б. Славин, Н.С. Каргин, Б.М. Славин // Геометрия и графика. — 2023. — Т. 11. — № 2. — С. 47–55. — DOI: 10.12737/2308-4898-2023-11-2-47-55
14. Alyousify A.L. AR-Assisted Children Book For Smart Teaching and Learning of Turkish Alphabets [Текст] / A.L. Alyousify, R.J. Mstafa // Virtual Reality & Intelligent Hardware. 2022, V.4, I.3. pp. 263–277. DOI: 10.1016/j.vrih.2022.05.002 URL: www.doi.org/10.1016/j.vrih.2022.05.002
15. Anabela M. A survey of multisensory VR and AR applications for cultural heritage [Текст] / M. Anabela, A. Gonçalves, M. Melo, M. Besso // Computers & Graphics. 2022, V. 102, pp. 426–440. DOI: 10.1016/j.cag.2021.106951 URL: www.doi.org/10.1016/j.cag.2021.10.001
16. Argelia Aguilera González N. (2015). How to Include Augmented Reality in Descriptive Geometry Teaching. Procedia Computer Science, 75, pp. 250–256. DOI: 10.1016/j.procs.2015.12.245
17. Ariansyah D. A head mounted augmented reality design practice for maintenance assembly: Toward meeting perceptual and cognitive needs of AR users [Текст] / D. Ariansyah, J.A. Erkounchu, I. Eimontaitė, T. Johnson, A.M. Oostveen, S. Fletcher, S. Sharples // Applied Ergonomics. 2022, V. 98, p. 103597. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2021> URL: www.doi.org/10.1016/j.apergo.2021
18. Bazarov S.E. Applying Augmented Reality in practical classes for engineering students [Текст] / S.E. Bazarov, I.Y. Kholodilin, A.S. Nesterov, A.V. Sokhina // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017, V. 87, p. 032004. DOI: 10.1088/1755-1315/87/3/032004 URL: www.doi.org/10.1088/1755-1315/87/3/032004
19. eLearning Industry [Электронный ресурс]. URL: <https://elearningindustry.com>. (дата обращения: 20.11.2024).
20. Hu X. Educational impact of an Augmented Reality (AR) application for teaching structural systems to non-engineering students / X. Hu, Y.M. Goh, Al. Lin // Advanced Engineering Informatics. 2021, V. 50, p. 101436. DOI: 10.1016/j.aei.2021.101436 URL: www.doi.org/10.1016/j.aei.2021.101436
21. International energy agency [Электронный ресурс]. URL: <https://www.iea.org>. (дата обращения: 20.11.2024).
22. Kharvari F. Impact of extended reality on architectural education and the design process / F. Kharvari, L.E. Kaiser // Automation in Construction. 2022, V. 141, p. 104393. — DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104393 URL: www.doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104393
23. Marino E. An Augmented Reality inspection tool to support workers in Industry 4.0 environments / E. Marino, L. Barbieri, B. Colacino, A. Kum Fleri, F. Bruno // Com-

- puters in Industry, 2021, V. 127, p. 103412. DOI: 10.1016/j.compind.2021.103412 URL: www.doi.org/10.1016/j.compind.2021.103412
24. Quint F. The Challenge of Introducing AR in Industry — Results of a Participative Process Involving Maintenance Engineers / F. Quint, F. Loch, P. Bertram // Procedia Manufacturing, 2017, V. 11, pp. 1319–1323. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.260 URL: www.doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.260
25. de Ravé E.G., Jiménez-Hornero F.J., Ariza-Villaverde A.B., Taguas-Ruiz J. (2016). DiedricAR: a mobile augmented reality system designed for the ubiquitous descriptive geometry learning. Multimedia Tools and Applications, 75 (16), pp. 9641–9663. DOI: 10.1007/s11042-016-3384-4
26. Schiavi B. BIM data flow architecture with AR/VR technologies: Use cases in architecture, engineering and construction [Tekst] / B. Schiavia, V. Havard, K. Beddiar, D. Baudry // Automation in Construction, 2022, p. 104054. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.104054 URL: www.doi.org/10.1016/j.autcon.2021.104054
27. Sharma B. Assimilating Disruptive Technology: A New Approach of Learning Science in Engineering Education [Tekst] / B. Sharma, A. Mantri // Procedia Computer Science. — 2020, V. 172, pp. 915–921. DOI: 10.1016/j.procs.2020.05.132 URL: www.doi.org/10.1016/j.procs.2020.05.132
28. Solmaz S. A practical development of engineering simulation-assisted educational AR environments [Tekst] / S. Solmaz, J.L. DominguezAlfaro, P. Santos, P. Van Puyvelde, T. Van Gerven // Education for Chemical Engineers, 2021, V. 35, pp. 81–93. DOI: 10.1016/j.ece.2021.01.007 URL: www.doi.org/10.1016/j.ece.2021.01.007
29. Sun X. Investigating Augmented Reality as a mode of representation for hearing and hearing-impaired preschool children / X. Sun, S. Zhou, Y. Zhang, Q. Wang, S. Wen // Investigating Augmented Reality as a mode of representation for hearing and hearing-impaired preschool children, 2022, p. 100523. DOI: 10.1016/j.ijcii.2022.100523 URL: www.doi.org/10.1016/j.ijcii.2022.100523
30. Tretyakova Z.O., Voronina M.V., Merkulova V.A. (2019) Geometric modelling of building forms using BIM, VR, AR-technology. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. V. 687 (2019) 044048, I. 4, pp. 1–8. DOI: 10.1088/1757-899X/687/4/044048
31. Verhulst I. Do VR and AR versions of an immersive cultural experience engender different user experiences? / I. Verhulst, A. Woods, L. Whittaker, J. Bennett, P. Dalton // Computers in Human Behavior, 2021, V. 125, p. 106951. DOI: 10.1016/j.chb.2021.106951 URL: www.doi.org/10.1016/j.chb.2021.106951
32. Voronina M.V., Tretyakova Z.O., Krivonozhkina E.G., Buslaev S.I., Sidorenko G.G. (2019). Augmented Reality in Teaching Descriptive Geometry, Engineering and Computer Graphics — Systematic Review and Results of the Russian Teachers' Experience. EURASIA Journal of Mathematics, Science and Technology Research, 15(12), pp. 1–17. DOI: 10.29333/ejmste/113503
33. Xie J. Framework for a closed-loop cooperative human Cyber-Physical System for the mining industry driven by VR and AR: MHCPS [Tekst] / J. Xie, S. Liu, X. Wanga // Computers & Industrial Engineering, 2022, V. 168, p. 108050. DOI: 10.1016/j.cie.2022.108050 URL: www.doi.org/10.1016/j.cie.2022.108050

References

1. Aver'yanov V.V., Troitskiy D.I. Knigi s dopolnennoj real'nost'yu kak effektivnyj obrazovatel'nyj instrument [Books with augmented reality as an effective educational tool]. Sb. nauchno-metodicheskikh materialov, tezisov i statey konferentsii «Virtual'naya i dopolnennaya real'nost'-2016: sostoyaniye i perspektivy» [Sat. scientific and methodological materials, abstracts and articles of the conference Virtual and augmented reality 2016: state and prospects]. Moscow, Izd-vo GPBOU MGOK, 2016, pp. 7–11. (in Russian)
2. Arsent'ev D.A. Vnedrenie elementov dopolnennoj realnosti v uchebno-metodicheskuyu literaturu [Introduction of augmented reality elements into educational literature]. V sbornike: Universitetskaya kniga: traditsii sovremennosti: materialy nauchno-prakticheskoy konferentsii [In the collection: University book: traditions, modernity, materials of a scientific and practical conference]. Moscow, 2015, pp. 18–22. (in Russian)
3. Belova O.P., Kaznin O.P. Primenenie tekhnologii dopolnennoj real'nosti dlya graficheskoy vizualizatsii uchebnykh zadach prostranstvennoj geometrii [Application of augmented reality technology for graphical visualization of educational tasks in spatial geometry]. Kontsept [Concept]. 2017, V. 39, pp. 3521–3525. URL: <http://e-koncept.ru/2017/971031.htm> (accessed: 01.04.2020).
4. Boykov A.A., Egiazaryan K.T., Efremov A.V., Kadykova N.S. Problemy geometro-graficheskoy podgotovki studentov vuzov [Problems of geometric-graphic training of university students]. Geometriya i grafika [Geometry and Graphics]. 2023, V. 11, I. 1, pp. 4–22. DOI: 10.12737/2308-4898-2023-11-1-4-22 (in Russian)
5. Dannye po mirovoj energetike i klimatu [Electronic resource]. URL: <https://yearbook.enerdata.ru> (accessed: 20.11.2024).
6. Ignat'ev S.A., Tret'yakova Z.O., Voronina M.V. Obzor obrazovatel'nykh kursov na osnove tekhnologij dopolnennoj real'nosti [Review of educational courses based on augmented reality technologies]. Geometriya i grafika [Geometry and graphics]. 2020, V. 8, I. 3, pp. 67–86. DOI: 10.12737/2308-4898-2020-67-86. (in Russian)
7. Ignat'ev S.A., Tret'yakova Z.O., Voronina M.V. Dopolnennaya real'nost' v nachertatel'noj geometrii [Augmented reality in descriptive geometry]. Geometriya i grafika. [Geometry and graphics]. 2020, V. 8, I. 2, pp. 41–50. DOI: 10.12737/2308-4898-2020-41-50 (in Russian)
8. Ignat'ev S.A., Tret'yakova Z.O., Voronina M.V. Tekhnologii dopolnennoj real'nosti v proektnoj deyatel'nosti studentov

- [Augmented reality technologies in student project activities]. *Geometriya i grafika* [Geometry and graphics]. 2020, V. 8, I. 2, pp. 51–57. DOI: 10.12737/2308-4898-2020-51-57 (in Russian)
9. Kozlova I.A., Slavin R.B., Slavin B.M. Graficheskie distsipliny i informatizatsiya inzhenernogo obrazovaniya [Graphic disciplines and informatization of engineering education]. *Geometriya i grafika* [Geometry and Graphics]. 2022, V. 10, I. 4, pp. 35–45. DOI: 10.12737/2308-4898-2022-10-4-35-45 (in Russian)
 10. Musaeva T.V., Urago A.A. Dopolnennaya real'nost' v provedenii zanyatij po inzhenernym tekhnicheskim distsiplinam proektirovaniya [Augmented reality in conducting classes in engineering and technical disciplines of design]. *Geometriya i grafika* [Geometry and Graphics]. 2021, V. 9, I. 2, pp. 29–45. DOI: 10.12737/2308-4898-2021-9-2-46-55 (in Russian)
 11. Oyuunzhargal Ch., Oyuunzayaa E. Tendentsii obucheniya v inzhenernoj grafike [Trends of training in engineering graphics]. *Geometriya i grafika* [Geometry and Graphics]. 2022, V. 10, I. 2, pp. 53–59. DOI: 10.12737/2308-4898-2022-10-2-53-59 (in Russian)
 12. Palij N.V. Pokadrovaya animatsiya v obuchenii nachertatel'noj geometrii [Frame-by-frame animation in teaching descriptive geometry]. *Geometriya i grafika* [Geometry and graphics]. 2023, V. 11, I. 3, pp. 39–46. DOI: 10.12737/2308-4898-2023-11-3-39-46 (in Russian)
 13. Slavin R.B., Kargin N.S., Slavin B.M. Razrabotka sistemy poluavtomaticheskogo modelirovaniya tryokhmernykh izobrazhenij [Development of systems for semi-automatic modeling of three-dimensional images]. *Geometriya i grafika* [Geometry and graphics]. 2023, V. 11, I. 2, pp. 47–55. DOI: 10.12737/2308-4898-2023-11-2-47-55 (in Russian)
 14. Alyousify A.L., Mstafa R.J. AR-Assisted Children Book For Smart Teaching and Learning of Turkish Alphabets Virtual Reality & Intelligent Hardware. 2022, V. 4, I. 3, pp. 263–277. DOI: 10.1016/j.vrih.2022.05.002 URL: www.doi.org/10.1016/j.vrih.2022.05.002.
 15. Anabela M., Gonçalves A., Melo M., Besso M. A survey of multisensory VR and AR applications for cultural heritage. *Computers & Graphics*. 2022, V. 102, pp. 426–440. DOI: 10.1016/j.chb.2021.106951. URL: www.doi.org/10.1016/j.cag.2021.10.001
 16. Argelia Aguilera González N. (2015). How to Include Augmented Reality in Descriptive Geometry Teaching. *Procedia Computer Science*, 75, pp. 250–256. DOI: 10.1016/j.procs.2015.12.245.
 17. Ariansyah D., Erkouncu J.A., Eimontaitė I., Johnson T., Oostveen A.M., Fletcher S., Sharples S. A head mounted augmented reality design practice for maintenance assembly: Toward meeting perceptual and cognitive needs of AR users. *Applied Ergonomics*. 2022, V. 98, p. 103597. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apergo.2021 URL: www.doi.org/10.1016/j.apergo.2021
 18. Bazarov S.E., Kholodilin I.Y., Nesterov A.S., Sokhina A.V. Applying Augmented Reality in practical classes for engineering students. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2017, V. 87, p. 032004. DOI: 10.1088/1755-1315/87/3/032004 URL: www.doi.org/10.1088/1755-1315/87/3/032004
 19. eLearning Industry [Электронный ресурс]. URL: https://elearningindustry.com. (дата обращения: 20.11.2024).
 20. Hu X., Goh Y.M., Lin Al. Educational impact of an Augmented Reality (AR) application for teaching structural systems to non-engineering students. *Advanced Engineering Informatics*. 2021, V. 50, p. 101436. DOI: 10.1016/j.aei.2021.101436 URL: www.doi.org/10.1016/j.aei.2021.101436
 21. International energy agency [Электронный ресурс]. URL: https://www.iea.org. (дата обращения: 20.11.2024).
 22. Kharvari F., Kaiser L.E. Impact of extended reality on architectural education and the design process. *Automation in Construction*. 2022, V. 141, pp. 104393. DOI: 10.1016/j.autcon.2022.104393. URL: www.doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104393.
 23. Marino E., Barbieri L., Colacino B., Kum Fleri A., Bruno F. An Augmented Reality inspection tool to support workers in Industry 4.0 environments. *Computers in Industry*. 2021, V. 127, pp. 103412. DOI: 10.1016/j.compind.2021.103412. URL: www.doi.org/10.1016/j.compind.2021.103412.
 24. Quint F., Loch F., Bertram P. The Challenge of Introducing AR in Industry — Results of a Participative Process Involving Maintenance Engineers. *Procedia Manufacturing*. 2017, V. 11, pp. 1319–1323. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.260 URL: www.doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.260
 25. de Ravé E.G., Jiménez-Hornero F.J., Ariza-Villaverde A.B., Taguas-Ruiz J. (2016). DiedricAR: a mobile augmented reality system designed for the ubiquitous descriptive geometry learning. *Multimedia Tools and Applications*, 75 (16), pp. 9641–9663. DOI: 10.1007/s11042-016-3384-4
 26. Schiavi B., Havard V., Beddiar K., Baudry D. BIM data flow architecture with AR/VR technologies: Use cases in architecture, engineering and construction. *Automation in Construction*. 2022, pp. 104054. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.104054 URL: www.doi.org/10.1016/j.autcon.2021.104054
 27. Sharma B., Mantri A. Assimilating Disruptive Technology: A New Approach of Learning Science in Engineering Education. *Procedia Computer Science*. 2020, V. 172, pp. 915–921. DOI: 10.1016/j.procs.2020.05.132 URL: www.doi.org/10.1016/j.procs.2020.05.132
 28. Solmaz S., Dominguez Alfaro J.L., Santos P., Van Puyvelde P., Van Puyvelde T. A practical development of engineering simulation-assisted educational AR environments. *Education for Chemical Engineers*. 2021, V. 35, pp. 81–93. DOI: 10.1016/j.ece.2021.01.007 URL: www.doi.org/10.1016/j.ece.2021.01.007
 29. Sun X., Zhou S., Zhang Y., Wang Q., Wen S. Investigating Augmented Reality as a mode of representation for hearing and hearing-impaired preschool children. Investigating Augmented Reality as a mode of representation for hearing and hearing-impaired preschool children. 2022, p. 100523. DOI: 10.1016/j.ijcici.2022.100523 URL: www.doi.org/10.1016/j.ijcici.2022.100523

30. Tretyakova Z.O., Voronina M.V., Merkulova V.A. (2019) Geometric modelling of building forms using BIM, VR, AR-technology. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. V. 687 (2019) 044048, I. 4, pp. 1–8. DOI: 10.1088/1757-899X/687/4/044048
31. Verhulst I., Woods A., Whittaker L., Bennett J., Dalton P. Do VR and AR versions of an immersive cultural experience engender different user experiences? Computers in Human Behavior. 2021, V. 125, p. 106951. DOI: 10.1016/j.chb.2021.106951 URL: www.doi.org/10.1016/j.chb.2021.106951
32. Voronina M.V., Tretyakova Z.O., Krivonozhkina E.G., Buslaev S.I., Sidorenko G.G. (2019). Augmented Reality in Teaching Descriptive Geometry, Engineering and Computer Graphics — Systematic Review and Results of the Russian Teachers' Experience. EURASIA Journal of Mathematics, Science and Technology Education, 15(12), pp. 1–17. DOI: 10.29333/ejmste/113503
33. Xie J., Liu S., Wang X. Framework for a closed-loop cooperative human Cyber-Physical System for the mining industry driven by VR and AR: MHCPS. Computers & Industrial Engineering. 2022, V. 168, p. 108050. DOI: 10.1016/j.cie.2022.108050 URL: www.doi.org/10.1016/j.cie.2022.108050