

Статья опубликована: 9 октября 2023 г.

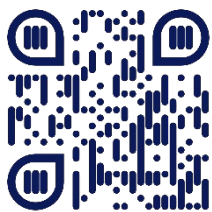
Относится к специальному выпуску «Управление инновациями в организациях в цифровую эпоху»

**Тема статьи:**

# **Революция в инженерном образовании – создание обучающей веб-платформы для иммерсионного обучения**



МАТРЕШКА  
РЕНЕССАНС



Сигнальный перевод подготовлен экспертом рабочей группы:  
Куприяновский В.П. v.kupriyanovsky@rut.digital 2023 г.



Рабочая группа по сквозным цифровым технологиям  
Совета по финансово-промышленной и инвестиционной политике  
Торгово-промышленной палаты Российской Федерации

**FMENGINEERING**  
**NEW REALITY**  
immersive technologies

## Абстракт

Инновационная педагогика в большей степени ориентирована на использование новых технологий в будущем образовании. Виртуальная и дополненная реальности, а также метавселенная сегодня являются катализаторами развития будущих инструментов обучения. Они позволяют учащимся открывать для себя через свои смартфоны или гарнитуры места по всему миру, оставаясь в своих классах или даже дома. Эти технологии также используются для практического применения, особенно в инженерных науках, уроках и практической работе путем создания иммерсивного опыта для пользователей. Это существенно изменит роль учителя и ученика в цифровых пространствах. Реализация обучающих платформ VR или AR требует междисциплинарных навыков, начиная от 3D-моделирования и заканчивая веб- и мобильными платформами. В данной работе представлен метод создания обучающей платформы по инженерным наукам на основе WebXR. Мы создали в нашей виртуальной среде урок о плате Arduino для обучения студентов STEM.

Ключевые слова: *Образование, виртуальная реальность, дополненная реальность, WebXR, метавселенная*

## 1. Введение

Одной из целей высшего образования является подготовка студентов, изучающих науку, технологию, инженерию и математику (STEM) для промышленности, обучая их инженерии, математике, науке и технологиям. Эти навыки необходимы студентам для достижения успеха на рынке труда, где технологии используются в различных областях, включая производство и управление.

Популярность 2D-технологий возросла после пандемии COVID-19, которая привела к глобальным ограничениям на социальную деятельность, включая учебу, работу и развлечения. В результате люди в значительной степени полагались на такие технологии, как Zoom и Teams, для проведения встреч и занятий. Исследователи увидели в этом возможность доказать, что физическое присутствие не всегда необходимо, пока можно обеспечить коммуникацию и обмен данными [11].

Следующей революцией после 2D-технологий являются 3D-технологии, которые обеспечивают более реалистичные методы, имитирующие поведение объектов в реальной жизни. Эти решения имеют ряд преимуществ, таких как повышение мотивации учащихся и навыков самообучения, формирование необходимых навыков и сокращение продолжительности обучения. Тем не менее, существуют проблемы, в том числе контроль продолжительности, зависимость от подключения к Интернету и влияние на социальную жизнь и безопасность человека.

Интересно, что учителя уже имеют возможность создавать интерактивный контент для своих учеников, чтобы улучшить их успеваемость и повысить их продуктивность, используя существующие на рынке инструменты [15]. Тем не менее, не всегда очевидно, что всем учителям разных поколений и уровней технологий легко создавать такой новый инновационный контент, поэтому перед нами встал большой вопрос о том, как мы можем объединить лучшие практики преподавания STEM в 3D-пространстве и максимально упростить большинство профилей учителей в одном месте. Мы считаем, что использование нашего решения позволит вывести образование 4.0 на новый уровень [1].

В данной работе мы представляем первую версию обучающей платформы с использованием виртуальной реальности. Мы создали два профиля: учитель и ученик. Преподаватель может создавать контент, интегрируя 3D-модели, аннотации, тексты, аудио и видео. Студент может участвовать в курсе и учиться по материалам, предоставленным преподавателем. Мы использовали платформу WebXR и реализовали ее на плате Arduino UNO.

Доклад будет организован следующим образом: Первый раздел – введение. Вторая часть будет посвящена смежным работам, касающимся образования в цифровых пространствах. В третьей части будет представлена следующая методология внедрения и использования предлагаемой платформы. Четвертая часть посвящена результатам. Наконец, мы подведем итоги и представим некоторые перспективы этой работы для будущих вкладов.

## 2. Сопутствующие работы

В современном ландшафте образования 4.0 высшее образование претерпевает глубокую цифровую трансформацию. Этот раздел посвящен изучению передовых разработок в этой области. В частности, мы углубимся в иммерсивные технологии, такие как виртуальная реальность (VR), дополненная реальность (AR) и смешанная реальность (MR). Кроме того, мы представим

интригующую концепцию метавселенной, которая готова сыграть ключевую роль в будущем образования.

## 2.1. Цифровая трансформация в высшем образовании: современное состояние

Когда мы говорим о цифровой трансформации в образовании 4.0, мы говорим о недавно появившихся инновационных технологиях, таких как виртуальная реальность, которая позволяет человеку чувствовать себя так, как будто он перенесся в другое место, не меняя физически своего положения или окружающей среды. Первый VR-опыт был создан в 1962 году и позволял пользователям совершить экскурсию по улицам Нью-Йорка [3]. В настоящее время люди стремятся обогатить свое окружение и опыт, не путешествуя и не прилагая особых усилий. Это вдохновлено тем, как человеческий мозг может подсознательно верить в сны во время сна.

Чтобы убедить мозг в том, что человек переносится в другое место, требуется несколько элементов. К ним относятся полное изменение визуальных элементов перед глазами под определенным углом и на определенном расстоянии [13], добавление звуковых эффектов к объектам в виртуальной среде и обеспечение взаимодействия с виртуальными элементами вокруг пользователя.

В настоящее время VR используется в самых разных секторах, от игр до коммерции и образования. Варианты использования могут варьироваться от сотрудников, использующих его в своей работе, до конечных пользователей, использующих его в качестве маркетингового решения или в качестве продукта для покупки.

Мы также говорим о дополненной реальности, когда человек видит объекты, которые на самом деле не находятся перед его глазами. AR в основном используется на мобильных телефонах и планшетах, которые оснащены камерами. AR отличается от VR тем, что объекты нужно добавлять в реальную среду [2].

Технически дополненная реальность требует наличия камеры и датчиков для обнаружения пространства и расчета измерений, определения типа и направления света, а также прогнозирования взаимодействия с пользователем. В качестве примера можно привести ARCore (Google) и ARKit (Apple), которые работают практически на всех современных мобильных операционных системах.

Есть и другие, которые мы можем найти, такие как MR, которые называются интерактивными виртуальными объектами с реальной физической средой и дополненной виртуальностью (AV), но в целом основное внимание уделяется VR, AR и MR, поэтому все они называются XR.

Также важно упомянуть метавселенную. Этот термин появился в романе «Лавина» в 1992 году [16]. С развитием технологий эксперименты с метавселенной находятся на стадии создания в отношении некоторых проблем, которые необходимо решить, но существует множество мини-метавселенных, которые доступны [9].

Вот некоторые из причин, по которым мы все еще строим метавселенную: создание одной метавселенной должно быть доступно в любое время с возможностью продолжения работы в последнем статусе, синхронизация в реальном времени с другими пользователями [5], свобода переходить с одной платформы метавселенной на другую и многое другое [10].

## 2.2. Точка зрения заинтересованных лиц нашего исследования

Использование XR-технологий в образовании необходимо обсуждать с точки зрения основных участников. Мы говорим о студентах, которых мы хотим улучшить, и преподавателях, которые захотят создать и спроектировать курсы. Обучение студентов может варьироваться в зависимости от многих факторов, таких как предыдущий опыт работы с технологиями, предпочтения в обучении и конкретный контекст, в котором используется AR и VR [8]. Тем не менее, некоторые общие точки зрения, которые студентам понравились в этом опыте и которые они сочли его полезным

Понимая эти перспективы, преподаватели и разработчики учебных пособий могут лучше разрабатывать AR и VR, отвечающие потребностям учащихся и поддерживающие их обучение [6].

С другой стороны, учителя также могут варьироваться в зависимости от нескольких факторов, таких как предыдущий опыт работы с технологиями, педагогический подход и конкретный контекст, в котором они используют AR и VR. Тем не менее, некоторые распространенные мнения о том, что учителя считают эту технологию перспективной, как указано в таблице 2, перечисляют отзывы учителей.

В целом, несмотря на то, что взгляды учителей на использование AR и VR для преподавания могут различаться, понимая эти перспективы, педагоги и педагоги-дизайнеры могут лучше разрабатывать AR и VR, которые поддерживают преподавание и обучение. Тем не менее, существует недостаток педагогического внедрения в этот вид высоких технологий для высшего образования или конкретно для STEM-образования. Ключевым решением для продвижения вперед является предоставление простых в использовании, удобных интерфейсов, которые могут использоваться учителями любого возраста или знакомы с технологией [17].

## 2.3. Виртуальные 3D-технологии в высшем образовании STEM

STEM расшифровывается как образование в области науки, технологий, инженерии и математики для учащихся после получения аттестата о среднем образовании, которое занимает в среднем 12 лет обучения. Цель, с точки зрения студентов, состоит в том, чтобы приобрести навыки, которые позволят им подготовиться к работе в отрасли [7,20].

Использование технологии XR становится обязательным для многих отраслей промышленности для увеличения объемов производства. Например, технологии используются для процесса обучения новых сотрудников, получения данных в режиме реального времени, использования искусственного интеллекта и машинного обучения для прогнозирования тенденций и решений, а также общения с меньшим количеством границ. Этот список слишком длинный, чтобы приводить его здесь.

В качестве примера можно привести использование виртуальной реальности для обучения технике безопасности на производствах, связанных с работой с опасными материалами или химическими веществами [14].

В заключение следует отметить, что интеграция технологий расширенной реальности (XR) меняет образовательный ландшафт, предлагая иммерсивный интерактивный опыт. Учащиеся выигрывают от повышения вовлеченности, лучшего понимания и расширенного сотрудничества, но технические проблемы и вопросы справедливости должны быть решены. В высшем образовании STEM XR становится незаменимым для подготовки выпускников к постоянно меняющимся требованиям различных отраслей. Он представляет собой преобразующий инструмент, который обещает переопределить будущее образования и обучения.

### 3.Методология

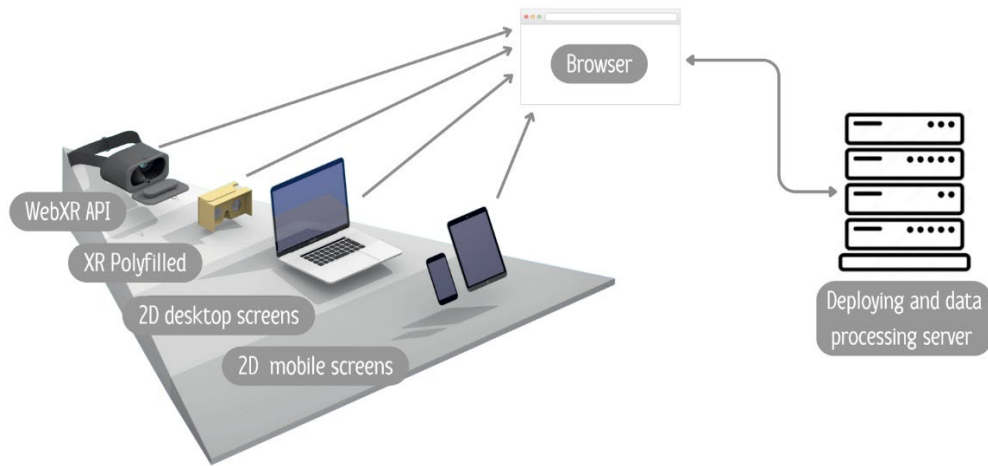
Мы считаем, что для того, чтобы сделать технологию XR доступной для всех учителей и с меньшими усилиями по изучению новой технологии или покупке модных XR-гарнитур с небольшим бюджетом, мы считаем, что доступ к этой технологии должен быть демократизирован благодаря тому, что доступ к этой технологии можно получить с любого устройства, имеющего браузер и подключение к Интернету.

Методология, принятая для разработки учебной платформы на основе WebXR, адаптированной для иммерсивного инженерного образования, включает в себя бесшовную интеграцию виртуальной и дополненной реальностей, использование потенциала метавселенной и реализацию платформы WebXR, с особым акцентом на создание целенаправленного урока, вращающегося вокруг платы Arduino, ориентированного на студентов STEM. Используя междисциплинарный подход, процесс разработки платформы объединяет навыки, охватывающие 3D-моделирование, разработку веб- и мобильных платформ, а также искусство создания образовательного контента. Получившаяся в результате платформа, предназначенная для содействия интерактивному взаимодействию между преподавателями и учащимися, способствует созданию, интеграции и эффективному предоставлению разнообразного иммерсивного образовательного контента. Создание контента, ключевой компонент, позволяет преподавателям курировать уроки с использованием различных медиа, включая 3D-модели, аннотации, текст, аудио и видео, тем самым создавая динамичную и обогащающую учебную среду. Универсальность выбранной платформы WebXR, подходящей как для смартфонов, так и для гарнитур, обеспечивает бесшовное и захватывающее обучение для студентов, предоставляя преподавателям универсальный инструмент для эффективного распространения контента. Наглядная иллюстрация возможностей платформы представлена на практическом уроке по плате Arduino, эффективно демонстрирующем слияние 3D-моделей, аннотаций и обучающих медиа для создания проницательного образования в области STEM. Итеративный процесс оценки и доработки гарантирует не только удобство использования и функциональность платформы, но и ее образовательную эффективность, с ценной информацией, полученной как от преподавателей, так и от студентов. Облегчая создание различных профилей для преподавателей и студентов, платформа предоставляет преподавателям привилегию создания контента и управления им, в то же время предоставляя студентам беспрепятственное участие в курсе и доступ к соответствующим материалам курса. Эта комплексная методология включает в себя интеграцию учебной платформы на основе WebXR, подчеркнутую уроками, ориентированными на плату Arduino, направленными на обеспечение увлекательного, интерактивного обучения в области инженерии.

На рисунке 1 показана мощь доступа к платформе XR из браузера любого устройства: не имеет значения, поддерживает ли устройство 2D, поэтому контент будет проецироваться, или оно поддерживает 3D, что является идеальным вариантом использования, они получают больше пользы от опыта виртуальной реальности. С другой стороны, приложение может быть развернуто как любое веб-приложение при условии поддержки библиотек WebXR.

Рис 1.

Как получить доступ к платформе, разработанной с использованием технологии WebXR [14].



## 4. Результаты

Учителя должны легко создавать свой контент с минимальными усилиями и временем, чтобы иметь качественный курс или обучение, добавляя активы; которые могут быть 3D-объектами и/или 2D-объектами, предварительно просматриваемыми или прослушиваемыми в браузере в созданном виртуальном сеансе. С другой стороны, учащиеся могут получить доступ к общему сеансу преподавателя и погрузиться в многопользовательское пространство для взаимодействия в режиме реального времени.

Одна из целей состоит в том, чтобы получить аналитику студентов, чтобы учитель мог следить за происходящим и быть скорее фасилитатором, чем инструктором.

### 4.1. Поддержка различных типов ресурсов для обучения

Ограниченный выбор для использования нескольких типов ресурсов, таких как видео, изображения и аудио... может быть полезным только в некоторых конкретных случаях, так как это зависит от цели, которую необходимо достичь.

AR и VR — не единственные технологии, названные до сих пор, поскольку у нас есть расширенная реальность, которая включает в себя уровень взаимодействия и поведенческие статусы, такие как случай помощи и изображения или видео 360°. Помимо AR и VR, технология XR (Extended Reality) также может использоваться для преподавания предметов STEM в высшем образовании. XR — это общий термин, который охватывает AR, VR и другие иммерсивные технологии, такие как смешанная реальность (MR) и тактильная обратная связь.

Виды поддержки, которые могут предложить технологии AR, VR и XR для преподавания предметов STEM в высшем образовании

В целом, технологии AR, VR и XR могут обеспечить различные виды поддержки для преподавания предметов STEM в высшем образовании, что может улучшить учебный опыт студентов и улучшить результаты обучения.

### 4.2. Использование технологии WebXR

WebXR — это термин, используемый для описания использования технологии расширенной реальности (XR) в Интернете. Это открытый стандарт, который позволяет разработчикам создавать и публиковать AR и VR, доступ к которым можно получить через веб-браузер, без необходимости для пользователей загружать и устанавливать дополнительное программное обеспечение [12]. WebXR поддерживается основными веб-браузерами, такими как Chrome, Firefox и Safari, и позволяет пользователям получать доступ к иммерсивному опыту на различных устройствах, включая

смартфоны, планшеты и шлемы виртуальной реальности (HMD). WebXR может поддерживать широкий спектр сценариев использования, включая образование, развлечения, электронную коммерцию и многое другое.

В контексте образования WebXR может предложить несколько преимуществ для преподавания и обучения. Например, преподаватели могут использовать WebXR для создания интерактивного и иммерсивного образовательного контента, который может заинтересовать учащихся и помочь им визуализировать и понять сложные концепции. Учащиеся могут получить доступ к этому контенту через свой веб-браузер без необходимости установки какого-либо дополнительного программного обеспечения.

WebXR также может обеспечить совместное обучение, позволяя студентам совместно работать над проектами и экспериментировать в общем виртуальном пространстве. Это может быть особенно полезно для студентов, которые учатся в разных местах или не могут посещать очные занятия. Кроме того, WebXR может предоставить доступ к образовательному контенту для студентов, у которых может не быть доступа к дорогостоящему оборудованию или программному обеспечению. Получая доступ к WebXR через веб-браузер, учащиеся могут использовать доступные устройства для доступа к высококачественному образовательному контенту.

Цель состоит в том, чтобы иметь доступ всякий раз, когда у вас есть браузер, поддерживающий функции XR [4]. Сравнительный отчет по технологиям WebXR по состоянию на 11 ноября 2022 года дает представление о текущем состоянии WebXR. Основываясь на исследованиях,

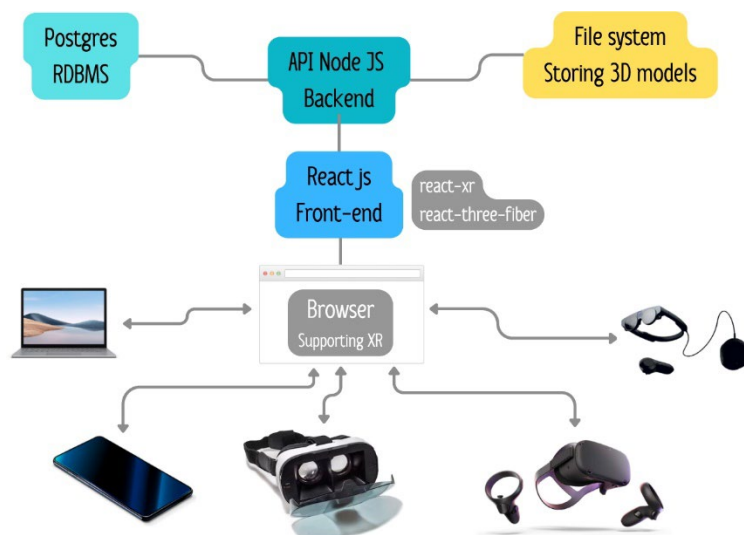
### 4.3. Реализация предложенного решения

После выбора технологии, которая может быть использована для разработки нашей платформы, были проведены тесты, чтобы выяснить пределы WebXR по сравнению с функциями, которые можно найти в нативном приложении. Результат был многообещающим; практически все может быть разработано в браузерах, поддерживающих XR.

Эти функции аналогичны тому, что мы можем иметь в нативном приложении для гарнитуры любого бренда для VR или AR. Three.js поддерживает более 50 форматов 3D-объектов, но самым популярным является glTF (glb двоичная версия для меньшего размера). Он дает доступ к объектным сеткам и материалам, чтобы мы могли изменить, например, цвет или положение. WebXR — это сложная технология со множеством кинематографических, математических и философских сложностей. В W3C мы можем найти самые современные возможности этой технологии [19].

Рис. 2.

Экосистема разработки платформы.





На рисунке 2 показана экосистема разработки, которую мы поддерживаем для создания платформы, особенно используемые технологии:

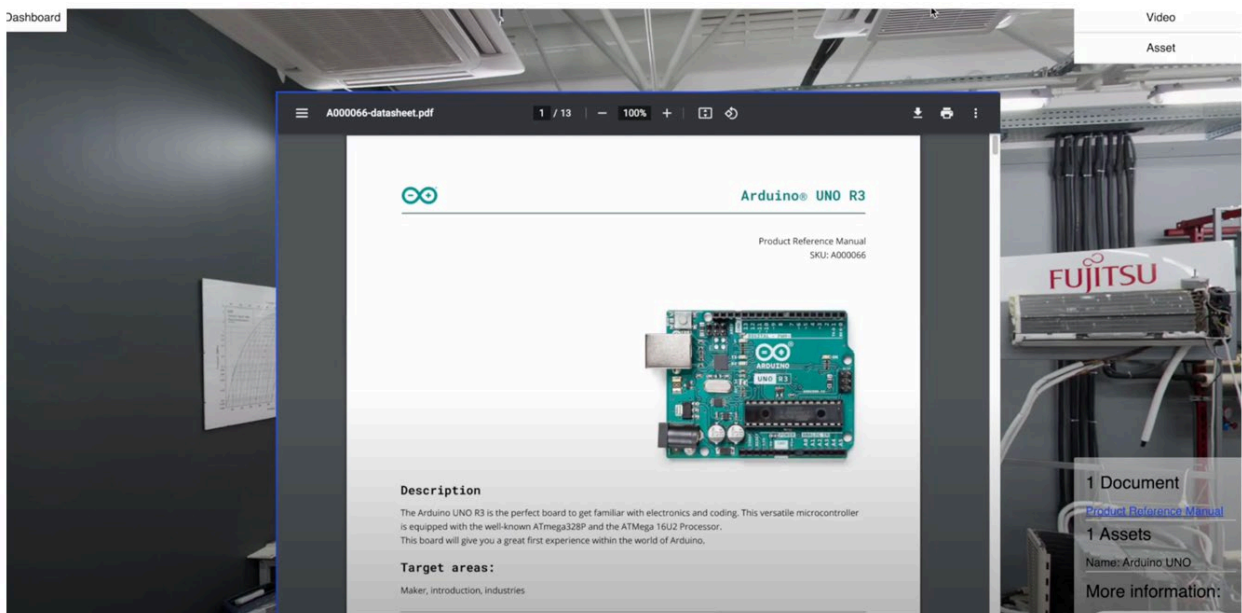
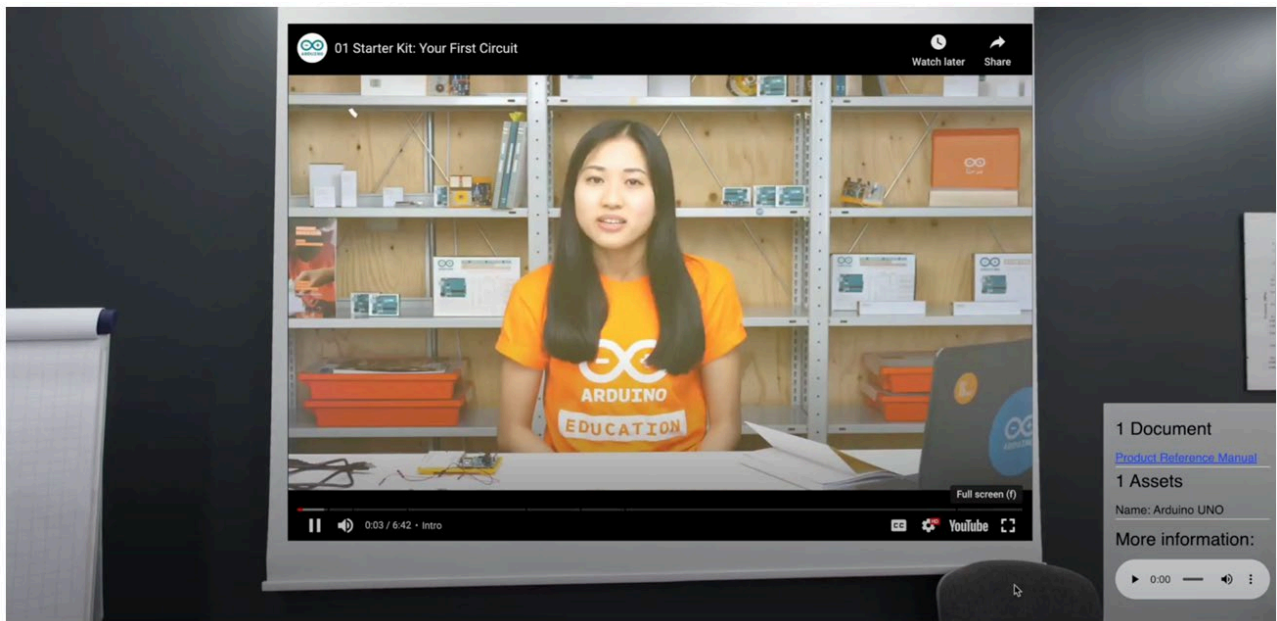
#### 4.4. Демонстрация

Первым шагом для преподавателя является вход в курс, используя свой адрес электронной почты и пароль. На втором этапе учащиеся присоединяются к сеансу с помощью кода, отправленного на их электронную почту или отправленного им напрямую. После того, как все подключены, все они могут просматривать одну и ту же визуальную информацию, следя за действиями учителя. В этой демонстрации мы используем 3D-модели карты Arduino UNO и электродвигателя.

Список курсов в зависимости от информации преподавателя. Панель управления преподавателя предоставляет доступ к ресурсам для управления созданными им курсами. Когда учитель входит в систему, виртуальный актив может быть добавлен в среду вместе с аннотациями для определенных точек в 3D-объекте; при нажатии на кнопку "Аннотация" мы видим номера аннотаций вокруг объекта с возможностью показать/скрыть детали по клику. Еще одна функция - добавить видео для воспроизведения в виртуальном пространстве, чтобы учащиеся могли скрыть 3D-объект и смотреть видео со всеми возможностями Youtube, например, смотреть в полноэкранном режиме. Кроме того, есть еще одна опция добавления аудио в качестве голосового объяснения. Чтобы сохранить все 2D-опции и функции, мы можем предварительно просмотреть документ с опцией печати, заполнения, экрана, масштабирования, прокрутки и всех остальных, которые могут быть предоставлены используемым браузером для предварительного просмотра PDF-документа.

Видео или аудио (в правом нижнем углу экрана) воспроизводится в виртуальном пространстве.





ОВ

#### 4.5.Аспект безопасности иммерсивных впечатлений

Основополагающий принцип обеспечения безопасности пользователей в иммерсивной учебной среде лежит в основе каждого аспекта архитектуры нашей платформы. В области конфиденциальности данных мы используем передовые протоколы шифрования, которые охватывают сквозную передачу данных, защищая конфиденциальную информацию пользователей от перехвата или несанкционированного доступа. Инфраструктура аутентификации усилена за счет бесшовной интеграции стандартных отраслевых протоколов, использующих OpenID Connect и OAuth 2.0 для надежного механизма единого входа (SSO). Это не только повышает безопасность пользователей, но и оптимизирует управление доступом на нескольких веб-платформах, обеспечивая унифицированную и безопасную аутентификацию. Системы обнаружения и предотвращения вторжений тесно вплетены в структуру нашей платформы, заблаговременно выявляя и устраняя потенциальные угрозы в режиме реального времени. Наша приверженность безопасности распространяется на ядро архитектуры, обеспечивая безопасную образовательную экосистему, в которой преподаватели и учащиеся могут уверенно взаимодействовать с иммерсивными возможностями, защищенными динамическим сочетанием мер шифрования, аутентификации и управления вторжениями.

## 5. Заключение и перспективы

Пандемия COVID-19 ускорила цифровую трансформацию в ряде отраслей, включая образование. Использование новых иммерсивных технологий в образовании через виртуальную реальность, дополненную реальность и метавселенную начинает становиться реальностью. В этой статье мы представляем образовательную платформу для инженерии на основе WebXR. Мы использовали 3D-модель платы Arduino UNO, к которой преподаватель добавил аннотации, чтобы облегчить доступ к информации для студента, участвующего в этом курсе. В качестве перспектив мы углубляемся в сферу совершенствования STEM-образования с помощью технологии WebXR. Выходя за рамки текущего ландшафта, мы выступаем за включение множества разнообразных курсов, обслуживающих различные дисциплины STEM и уровни образования. Предлагаемое нами решение включает в себя интеграцию сложных 3D-моделей для улучшения понимания учащимися сложных концепций. Чтобы обеспечить захватывающий процесс обучения, мы делаем упор на слияние текста, изображений, видео и файлов для эффективной передачи информации. Кроме того, мы подчеркиваем важнейший аспект взаимодействия с пользователем и отслеживания, что позволяет персонализировать процесс обучения. В кульминации каждого курса мы предлагаем интеграцию комплексных обзоров и оценок для закрепления понимания студентами. Мы также представляем углубленный анализ влияния нашего решения WebXR на повышение квалификации учителей, исследуя, как педагогические навыки преподавателей могут быть улучшены с помощью интерактивного и управляемого данными опыта, тем самым способствуя созданию целостной образовательной экосистемы STEM.

Учителям, возможно, придется использовать технологии в качестве поддержки своих курсов, но большинство инструментов предназначены только для помощи или полностью виртуального опыта в 2D-формате. Наша цель состоит в том, чтобы упростить инструмент, чтобы учителя могли создавать свои курсы в соответствии со своей педагогикой в полностью иммерсивном опыте.

Мы хотели бы оценить решение, над которым мы работаем, собирая отзывы учителей STEM из разных учреждений, и улучшать решение до тех пор, пока не получим удовлетворительный результат, чтобы учителя могли легко создавать свой XR-контент для своих учеников, а также мы хотели бы изучить поведение учащихся и включить технологии искусственного интеллекта и IoT, чтобы улучшить обучение студентов и облегчить учителям становление фасилитаторов.

## Конфликт интересов

Докладывать не о чем.

## References

- Billingsley, S. Smith, S. Smith and J. Meritt, A systematic literature review of using immersive virtual reality technology in teacher education, *J. Interact. Learn. Res.* 30: ((2019) ), 65–90.
- Dunleavy, Design principles for augmented reality learning, *TechTrends.* 58: ((2014) ), 28–34. doi:[10.1007/s11528-013-0717-2](https://doi.org/10.1007/s11528-013-0717-2).
- van Gigante, 1 – virtual reality: Definitions, history and applications, in: *Virtual Real. Syst.*, ed. Earnshaw, M.A. Gigante and H. Jones, eds, Academic Press, Boston, (1993) , pp. 3–14. doi:[10.1016/B978-0-12-227748-1.50009-3](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-227748-1.50009-3).
- Immersive Web Developer WEBXR – supported browsers, (n.d.). <https://immersiveweb.dev/#supporttable> (accessed April 3, 2023).
- Sharma and P.J. Pramod, A collaborative metaverse based A-la-carte framework for tertiary education (CO-MATE), *Heliyon.* 9: ((2023) ), e13424. doi:[10.1016/j.heliyon.2023.e13424](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13424).
- Al-Kuhail, A. ElSayary, S. Farooq and A. Alghamdi, Exploring immersive learning experiences: A survey, *Informatics.* 9: ((2022) ), 75. doi:[10.3390/informatics9040075](https://doi.org/10.3390/informatics9040075).
- Lederman, D.L. Zeidler and J.S. Lederman, *Handbook of Research on Science Education: Volume III*, 1st edn, Routledge, New York, (2023) . doi:[10.4324/9780367855758](https://doi.org/10.4324/9780367855758).
- Al-Markas and J. Thomas, Adoption of virtual reality technology in higher education: An evaluation of five teaching semesters in a purpose-designed laboratory, *Educ. Inf. Technol.* 27: ((2022) ), 1287–1305. doi:[10.1007/s10639-021-10653-6](https://doi.org/10.1007/s10639-021-10653-6).
- Al-Mystakidis, Metaverse, *Encyclopedia.* 2: ((2022) ), 486–497. doi:[10.3390/encyclopedia2010031](https://doi.org/10.3390/encyclopedia2010031).
- Al-Mutairi, M. Park and Y.-G. Kim, A metaverse: Taxonomy, components, applications, and open challenges, *IEEE Access.* 10: ((2022) ), 4209–4251. doi:[10.1109/ACCESS.2021.3140175](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3140175).
- Przyrembowska, K. Masztalerz, M. Garlińska and M. Osial, A worldwide journey through distance education—from the post office to virtual, augmented and mixed realities, and education during the Covid-19 pandemic, *Educ. Sci.* 11: ((2021) ), 118. doi:[10.3390/educsci11030118](https://doi.org/10.3390/educsci11030118).
- Rodríguez, M. Dal Peraro and L.A. Abriata, Democratizing interactive, immersive experiences in science education with WebXR, *Nat. Comput. Sci.* 1: ((2021) ), 631–632. doi:[10.1038/s43588-021-00142-8](https://doi.org/10.1038/s43588-021-00142-8).
- Rzepka, K.J. Hussey, M.V. Maltz, K. Babin, L.M. Wilcox and J.C. Culham, Familiar size affects perception differently in virtual reality and the real world, *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 378: ((2023) ), 20210464. doi:[10.1098/rstb.2021.0464](https://doi.org/10.1098/rstb.2021.0464).
- Sanfilippo, T. Blazauskas, G. Salvietti, I. Ramos, S. Vert, J. Radianti, T.A. Majchrzak and A. Oliveira, A perspective review on integrating VR/AR with haptics into STEM education for multi-sensory learning, *Robotics.* 11: ((2022) ), 41. doi:[10.3390/robotics11020041](https://doi.org/10.3390/robotics11020041).
- Sigahi, A.C. Rampasso, R. Anholon and L.I. Sznalwar, Classical paradigms versus complexity thinking in engineering education: An essential discussion in the education for sustainable development, *Int. J. Sustain. High. Educ.* 24: ((2023) ), 179–192. doi:[10.1108/IJSHE-2021-0472](https://doi.org/10.1108/IJSHE-2021-0472).
- Snow Crash, (n.d.). <https://www.goodreads.com/book/show/40651883-snow-crash> (accessed March 15, 2023).

/ergara, Á. Antón-Sancho and P. Fernández-Arias, Player profiles for game-based applications in engineering education, *Comput. Appl. Eng. Educ.* 31: ((2023) ), 154–175. [:10.1002/cae.22576](https://doi.org/10.1002/cae.22576).

bXR – Samples Explainer, (n.d.). <https://immersive-web.github.io/webxr-samples/explainer.html> (accessed April 3, 2023).

bXR Device API, (n.d.). <https://www.w3.org/TR/webxr/> (accessed April 4, 2023).

Die, M. Fang, K. Shauman and S.T.E.M. Education, *Annu. Rev. Sociol.* 41: ((2015) ), 331–357. [:10.1146/annurev-soc-071312-145659](https://doi.org/10.1146/annurev-soc-071312-145659).