



*Multimodal Technologies  
and Interaction*

Buchanan, E.; Loporcaro, G.; Lukosch, S. On the Effectiveness of Using Virtual Reality to View BIM Metadata in Architectural Design Reviews for Healthcare. *Multimodal Technol. Interact.* 2023, 7, 60. <https://doi.org/10.3390/mti7060060>

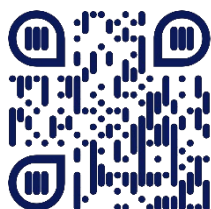
Статья опубликована: 7 июня 2023 г.

«Мультимодальные пользовательские интерфейсы и опыт: проблемы, приложения и перспективы»

## Тема статьи: Об эффективности использования виртуальной реальности для просмотра метаданных BIM в обзорах архитектурного проектирования для здравоохранения



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

При поддержке:

FMENGINEERING

NEW REALITY

immersive technologies

## Абстракт

В этой статье сообщается об исследовании, в котором оценивалось, можно ли использовать виртуальную реальность (VR) для отображения метаданных информационного моделирования зданий (BIM) вместе с пространственными данными в виртуальной среде, и тем самым определить, повышает ли это эффективность проверки проекта за счет улучшения понимания участниками проекта. Предыдущие исследования продемонстрировали потенциал виртуальной реальности для улучшения анализа проектов, особенно способность передавать пространственную информацию, но было проведено ограниченное исследование того, как виртуальная реальность может передавать дополнительные метаданные BIM. В ходе пользовательского исследования, в котором приняли участие 17 медицинских работников, оценивались действия и предпочтения участников при заполнении обзоров проектов в виртуальной реальности или использовании традиционной системы проверки проектов, состоящей из чертежей в формате PDF и 3D-модели. Состояние VR имело более высокий уровень выполнения задач, более высокий балл SUS и, как правило, более быстрое время выполнения. VR повышает эффективность проверки проекта, проводимой медицинскими работниками.

**Ключевые слова:** *BIM; виртуальная реальность; архитектура; дизайн здравоохранения; иммерсивная виртуальная среда; дизайн; дизайнерские исследования*

## 1. Введение

За последние два десятилетия в отрасли архитектуры, проектирования и строительства (AEC) наблюдался ежегодный рост производительности примерно на 1%. Это значительно ниже годового прироста экономики в целом на 2,8% и обрабатывающей промышленности на 3,6% [1]. Отсутствие производительности часто объясняется фрагментарностью отрасли, а также ограниченностью инвестиций в новые цифровые технологии [2]. Внедрение информационного моделирования зданий способствовало повышению производительности труда, а также повышению эффективности работы и качества проектов [3]. Хотя BIM облегчил внедрение 3D-чертежей для коммуникации, специалисты AEC по-прежнему в основном передают свои проекты клиентам и заинтересованным сторонам через планы, разрезы и фасады [4]. Заинтересованным сторонам за пределами отрасли AEC трудно понять эти 2D-чертежи, что делает этот способ связи неэффективным и дорогостоящим [4,5]. По оценкам Национального института стандартов и технологий, ежегодные затраты на обеспечение функциональной совместимости в течение всего жизненного цикла здания составляют 15,8 миллиардов долларов США. В эту сумму вошли затраты на доработку проектного файла, запросы информации, доработку строительной площадки, задержки и т. д. [6].

Медицинские учреждения являются важнейшими элементами инфраструктуры общества, оказывающими медицинскую помощь и уход за пациентами. Проектирование медицинских учреждений требует привлечения специалистов-консультантов по проектированию, а также участия заинтересованных сторон и медицинского персонала в ходе рассмотрения проекта. Заинтересованные стороны должны предоставить обратную связь и «одобрить» проектные решения. Обзоры проекта обычно состоят из пакета 2D-чертежей (планы зданий, разрезы, фасады) и технических спецификаций, а также нескольких 3D-изображений, которые заинтересованные стороны должны просмотреть и прокомментировать. Заинтересованным сторонам и медицинскому персоналу часто бывает трудно интерпретировать 2D-чертежи из-за отсутствия специальных знаний в области архитектуры или инженерии [7]. Это неизбежно

приводит к недопониманию между клиентом и командой дизайнеров и неправильным проектным решениям. Исследования показали, что качество искусственно созданной среды влияет на здоровье пациентов, поэтому последствия плохого результата проектирования — это нечто большее, чем просто финансовое бремя [8,9,10]. Из-за узкоспециализированного характера архитектуры здравоохранения эффективный инструмент проверки проекта, использующий новейшие цифровые технологии, такие как BIM и виртуальная реальность (VR), должен считаться жизненно важным для групп разработчиков здравоохранения [11,12].

Преыдушие исследования успешно изучали применение интегрированной системы BIM/VR в качестве платформы визуализации и моделирования для проектирования здравоохранения [7]. Однако, несмотря на более широкое внедрение BIM и VR в отрасли AEC, весь потенциал BIM и VR еще не использован. В частности, использование только геометрической информации из модели BIM в среде VR ограничивает преимущества технологии BIM/VR. Таким образом, его полный потенциал может быть реализован, когда негеометрические метаданные BIM визуализируются и передаются через иммерсивные интерфейсы виртуальной реальности [13].

Это исследование направлено на определение можно ли использовать VR для эффективной передачи дополнительной технической информации, чтобы помочь заинтересованным сторонам понять сложности и особенности проекта в области здравоохранения. Эта дополнительная информация получена из модели BIM консультантов AEC с использованием метаданных BIM, созданных из таких программ, как Autodesk Revit.

Чтобы определить, полезно ли рассмотрение архитектурного проекта в виртуальной реальности вместе с метаданными BIM для процесса проектирования, было проведено пользовательское исследование с участием 17 медицинских работников, в ходе которого участники рассмотрели проект больницы в двух разных условиях. Первое условие имитировало традиционный пакет проверки дизайна с архитектурными чертежами и спецификациями в формате PDF, а также цифровой трехмерной настольной моделью. Вторым условием была модель VR с закодированными метаданными BIM. В ходе этих обзоров участникам было предложено выполнить ряд заданий с целью оценить их понимание дизайна. После этого они заполнили анкету по шкале юзабилити системы (SUS) [14] и дали короткое интервью, посвященное их опыту.

Был проведен обзор аналогичных исследований, и на его основе было установлено, что во многих исследованиях эффективность виртуальной реальности рассматривалась в обзорах дизайна для архитектуры; однако это ограничивалось геометрической и пространственной информацией, и лишь немногие исследования изучали потенциал отображения технических метаданных BIM наряду с геометрическими данными. После следующего раздела «Предпосылки» в разделе «Материалы и методы» определяются вопросы исследования, представлен использованный прототип и описывается пользовательское исследование. Далее следуют разделы «Результаты» и «Обсуждение». Статья завершается разделом «Выводы».

## **2. Предыстория**

### **2.1. Обзоры проектов в архитектуре здравоохранения**

Обзоры дизайна проводятся на протяжении всего этапа проектирования проекта для проверки его соответствия заданию и получения одобрения заинтересованных сторон [15]. Поскольку задание развивается на протяжении всего процесса проектирования, должен быть способ отслеживать изменения; эта функция в настоящее время отсутствует в существующих

инструментах проверки [16]. Это важно при проектировании здравоохранения, поскольку специализированное оборудование может быстро меняться, и эти изменения необходимо отслеживать и понимать всеми сторонами.

Архитектурные 2D-чертежи содержат ограниченную информацию, необходимую для анализа проекта. С другой стороны, было показано, что физические макеты являются эффективным инструментом коммуникации при проектировании [17,18]. Однако их создание обходится дорого, требует много времени и предлагает ограниченные возможности при рассмотрении альтернативных вариантов конструкции [19]. Проведение экспертизы проекта в виртуальной реальности значительно дешевле, чем создание макета 1:1 или доработка во время строительства [17].

## 2.2. Архитектура здравоохранения

Проекты в сфере здравоохранения очень сложны и требуют участия многих специалистов АЕС. У них часто есть много разных клиентов или заинтересованных сторон, каждый из которых имеет особые требования [20]. Функции пространства часто меняются с появлением новых разработок [21]. По сравнению с другими проектами, здесь требуется большое количество светильников, мебели и оборудования (FF&E), которые необходимо скоординировать и правильно расположить. Большая часть этого оборудования является специализированной и часто предъявляет особые требования к пространству и служебному подключению, которые могут быть не сразу очевидны для группы разработчиков. Предыдущие исследования показали, что заинтересованным сторонам могут быть трудно понять, что представляют собой эти элементы в 2D-планах [17].

## 2.3. BIM и метаданные

Специалисты АЕС создают 3D-модели с использованием программного обеспечения для информационного моделирования зданий (BIM). Хотя BIM часто называют 3D-моделью, это нечто большее; это совокупность процессов, которые позволяют междисциплинарным группам получать доступ к разнообразной информации на протяжении всего жизненного цикла здания [22,23]. Модели BIM также используются для создания планов, разрезов и фасадов, которые обычно встречаются в пакетах архитектурных чертежей. Однако у них есть потенциал сделать больше [12]. Каждый элемент в модели BIM может хранить широкий спектр метаданных, включая количества, свойства материалов, размеры, комментарии, этапы, информацию о производителе, затраты и т. д. Хотя большинство объектов BIM имеют ограниченное количество запрограммированных метаданных, проектировщики имеют возможность расширять набор данных по мере необходимости, обеспечивая возможность добавления дополнительной информации для облегчения процесса рассмотрения проекта [24]. Эта информация может включать спецификации специализированного оборудования, например, используемого в сфере здравоохранения.

## 2.4. Виртуальная реальность в обзорах архитектурного дизайна

Иммерсивные виртуальные среды (IVE) в виртуальной реальности предоставляют быстрый и удобный инструмент оценки по сравнению с физическими макетами [25]. Многопользовательские обзоры дизайна помогли получить информацию от медперсонала с помощью виртуального макета [11]. Макеты VR можно использовать для анализа проектов на высоком уровне детализации и обсуждения изменений в стоимости [26]. Однако участникам может быть сложно переключаться между моделью прототипа и проектной документацией (предположительно, это цифровые PDF-файлы), поэтому им рекомендуется иметь проектную

документацию для разметки на компьютере. соседняя смарт-доска [26]. Обширный обзор литературы о текущем состоянии исследований АЕС VR на основе BIM выявил недостаточное использование негеометрических данных BIM как один из основных пробелов [13]. В другом исследовании [27] использование гибридных медиа — виртуальной реальности с традиционными 2D-рисунками — дало лучший общий результат. В этом исследовании [27] делается вывод, что VR следует использовать в сочетании с 2D-чертежами и «BIM» для более надежного анализа проекта.

## 2.5. Обзоры проектов на основе моделирования/сценариев

В ходе сценарного исследования медсестры оценивали три различных предоперационных палаты в виртуальной реальности, выполняя несколько задач [28]. Исследование завершилось явным предпочтением одного варианта и отметило, что, используя оценку на основе сценариев, участники смогли взаимодействовать со своей средой, обеспечивая более «клинически значимое и систематическое сравнение нескольких вариантов дизайна» [28]. В предпочтительном дизайне это выглядело так, как будто вместо гораздо большей больничной койки использовались носилки, создавая иллюзию пространства. Хотя в исследовании не упоминается, почему это было сделано, было бы интересно узнать, считают ли исследователи, что это оказало влияние, поскольку одной из упомянутых причин такого предпочтительного дизайна было «увеличенное пространство вокруг кровати» [28]. Это говорит о том, что идентификация мебели в виртуальной реальности не так ясна, как пришли к выводу другие исследования, и использование метаданных BIM потенциально может уменьшить некоторые из этих ошибок.

В предыдущем исследовании на основе сценариев [17] конечные пользователи сравнили эффективность четырех различных режимов архитектурной коммуникации: (1) 2D-планы; (2) распечатанные трехмерные изображения с планами; (3) физический макет; и (4) макет виртуальной реальности. Физический макет был признан наиболее полезным способом общения, за ним следовали VR-макеты с 2D-планами, а 3D-перспектива была наименее полезной. Исследование [17] выявило недостаточную точность воспроизведения как причину того, что платформа VR работает хуже, чем ожидалось. Макет виртуальной реальности вызвал меньше всего дизайнерских предложений, тогда как физический макет вызвал больше всего. Авторы приходят к выводу, что четыре разных способа общения могут дополнять друг друга, поскольку все они иллюстрируют разные аспекты дизайна.

## 2.6. Краткое содержание

В этом вводном разделе выявлены некоторые явные пробелы в исследованиях обзоров дизайна виртуальной реальности для здравоохранения. Если проблемы, возникающие при проверке дизайна, связаны с плохой связью, из этого следует, что использование режима, обеспечивающего максимальную точность отображения информации, будет полезным. В нескольких из вышеперечисленных статей указывается на необходимость традиционных архитектурных планов наряду с моделью VR [17,27,28]. Это говорит о том, что существует необходимость отображать информацию, выходящую за рамки пространственных и геометрических данных, обычно представленных в виртуальной реальности. В этой статье мы стремимся использовать преимущества и улучшить ограничения, с которыми столкнулись в предыдущих исследованиях, путем внедрения системы, которая позволяет пользователям просматривать метаданные BIM, обычно встречающиеся в архитектурных планах и

спецификациях, в виртуальной реальности, с целью повышения эффективности проверок проекта.

### 3. Материалы и методы.

#### 3.1. Вопросы исследования

Целью этого исследования является определение эффективности проведения экспертизы архитектурного проекта с помощью VR-гарнитуры для проектов здравоохранения путем измерения того, насколько хорошо участники понимают предлагаемый проект, сколько времени им требуется для выполнения набора задач, а также воспринимаемого удобства использования инструмента проверки. Предыдущие исследования уже подчеркнули преимущества процесса проверки дизайна, который предлагает VR. Целью этого исследования является способность виртуальной реальности передавать семантически богатые метаданные BIM таким образом, чтобы заинтересованные стороны могли завершить анализ проекта с меньшим количеством ошибок, вызванных непониманием.

Эффективность проверки дизайна будет оцениваться с помощью ряда задач, призванных проверить понимание участниками проекта, удобство использования инструмента проверки дизайна и время, необходимое для завершения проверки проекта.

#### 3.2. Опытный образец

Чтобы проверить, можно ли просматривать метаданные BIM с помощью гарнитуры VR (Oculus Quest 2, <https://www.meta.com/nz/quest/products/quest-2/>, по состоянию на 19 мая 2023 г.), операционное подразделение больницы был спроектирован и создан в Autodesk Revit (<https://www.autodesk.co.nz/products/revit/overview?term=1-YEAR> (по состоянию на 28 апреля 2023 г.)), ведущем программном обеспечении АЕС. Операционный блок был разбит на два уникальных модуля; (1) Театральный модуль и (2) Модуль восстановления. Затем модули Operating Unit были экспортированы из Revit с помощью Unity Reflect (<https://unity.com/products/unity-reflect> (по состоянию на 28 апреля 2023 г.)) в Unity Game Engine (<https://unity.com> (по состоянию на 28 апреля 2023 г.)). 28 апреля 2023 г.)). Unity Reflect поддерживает точность метаданных BIM, позволяя использовать их в Unity Game Engine. Модели также были экспортированы с помощью плагина Revit Enscape (<https://enscape3d.com/> (по состоянию на 28 апреля 2023 г.)) для создания 3D-модели рабочего стола; это означало, что те же модели и наборы данных можно было использовать для Virtual Reality условия эксперимента и условия эксперимента в формате PDF + 3D модели. Два модуля, «Реабилитационное отделение» и «Театральное отделение», были разработаны с использованием в качестве руководства «Руководства для австралийских медицинских учреждений – операционное отделение» [29]. Стандартные размеры помещений, отделка и оборудование были взяты из Австралийских руководящих принципов для медицинских учреждений (AusHFG: <https://healthfacilityguidelines.com.au/australasian-health-facility-guidelines> (по состоянию на 28 апреля 2023 г.)) и их Библиотека Autodesk Revit. AusHFG широко используется в Австралии и Новой Зеландии при проектировании больниц. На рисунке 1 ниже показано 3D-вид из файла Revit Theater Module. На рис. 2 показан модуль восстановления.

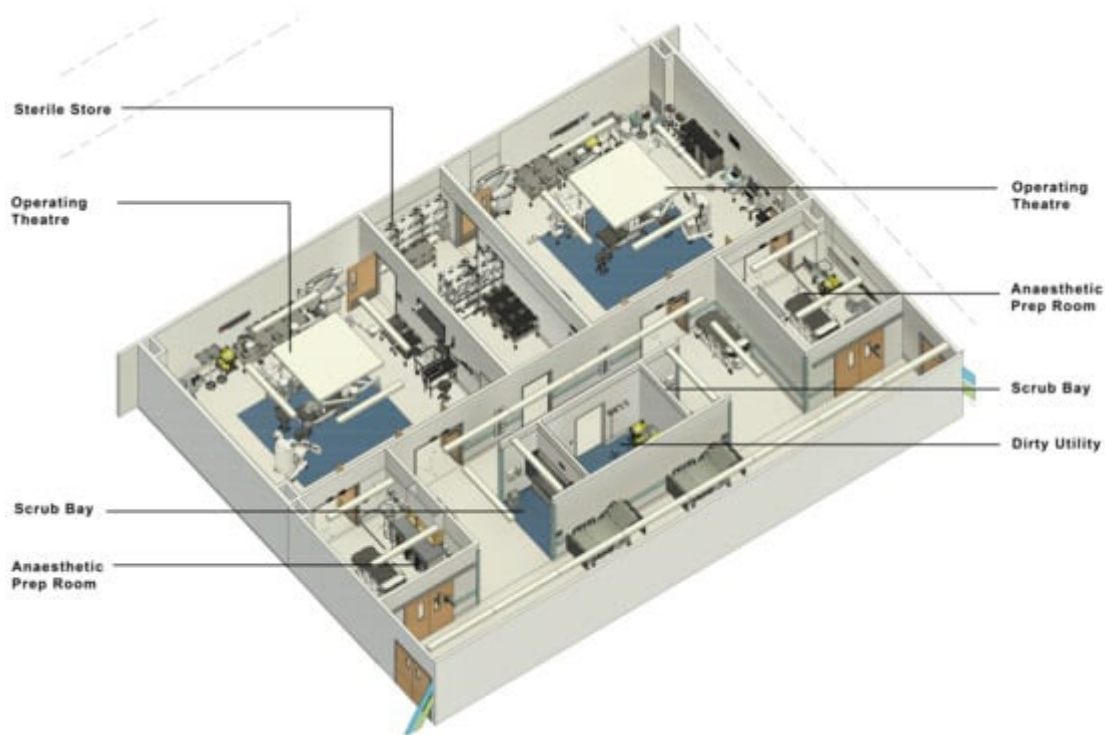


Рис. 1. 3D-вид Revit модуля «Театр».

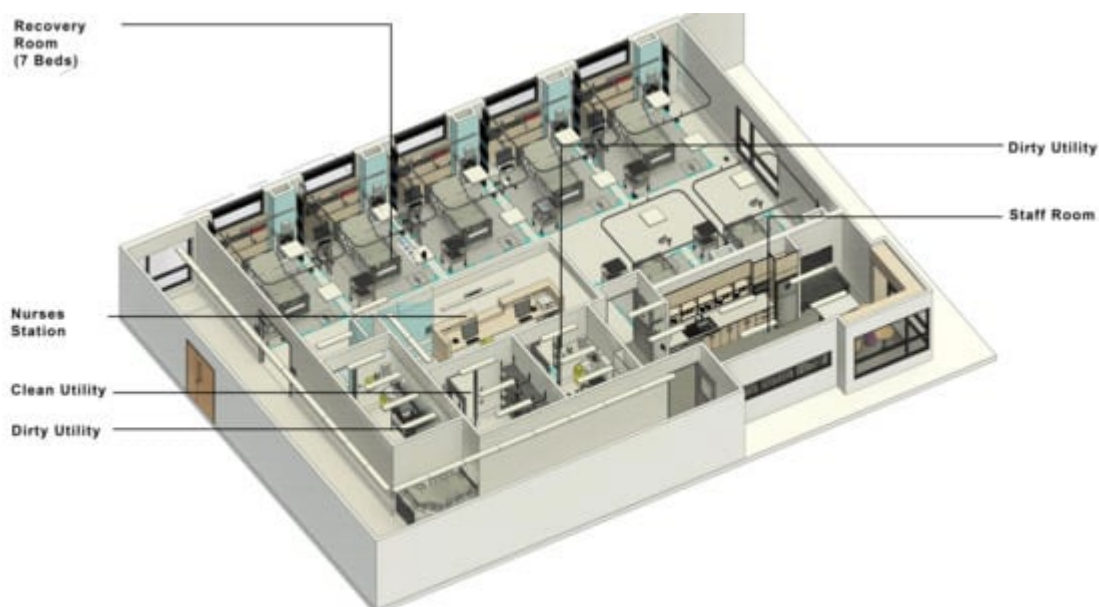


Рис. 2. 3D-вид Revit модуля восстановления.

### 3.3. Дизайн исследования

Это исследование было одобрено Комитетом по этике человеческих исследований (HREC) нашего университета. В эксперименте использовался смешанный метод оценки, проводились количественный опросник и качественное интервью. Эксперимент представлял собой дизайн «Латинского квадрата» внутри субъектов, в котором все участники оценивали как виртуальную реальность, так и состояние PDF.

Перед началом эксперимента участники заполнили анкету о своем опыте работы с виртуальной реальностью (см. Приложение А). Затем участники рассмотрели дизайн одного модуля в одном состоянии.

В начале каждого условия участники проходили короткое обучение, рассчитанное примерно на 10 минут. Участникам было предложено выполнить 3 задания, чтобы дать им навыки для завершения основного эксперимента, при этом экспериментатор отвечал на

любые вопросы и помогал участникам, если у них возникали трудности с заданием. На рисунке 3 ниже показана типичная инструкция в буфере обмена.

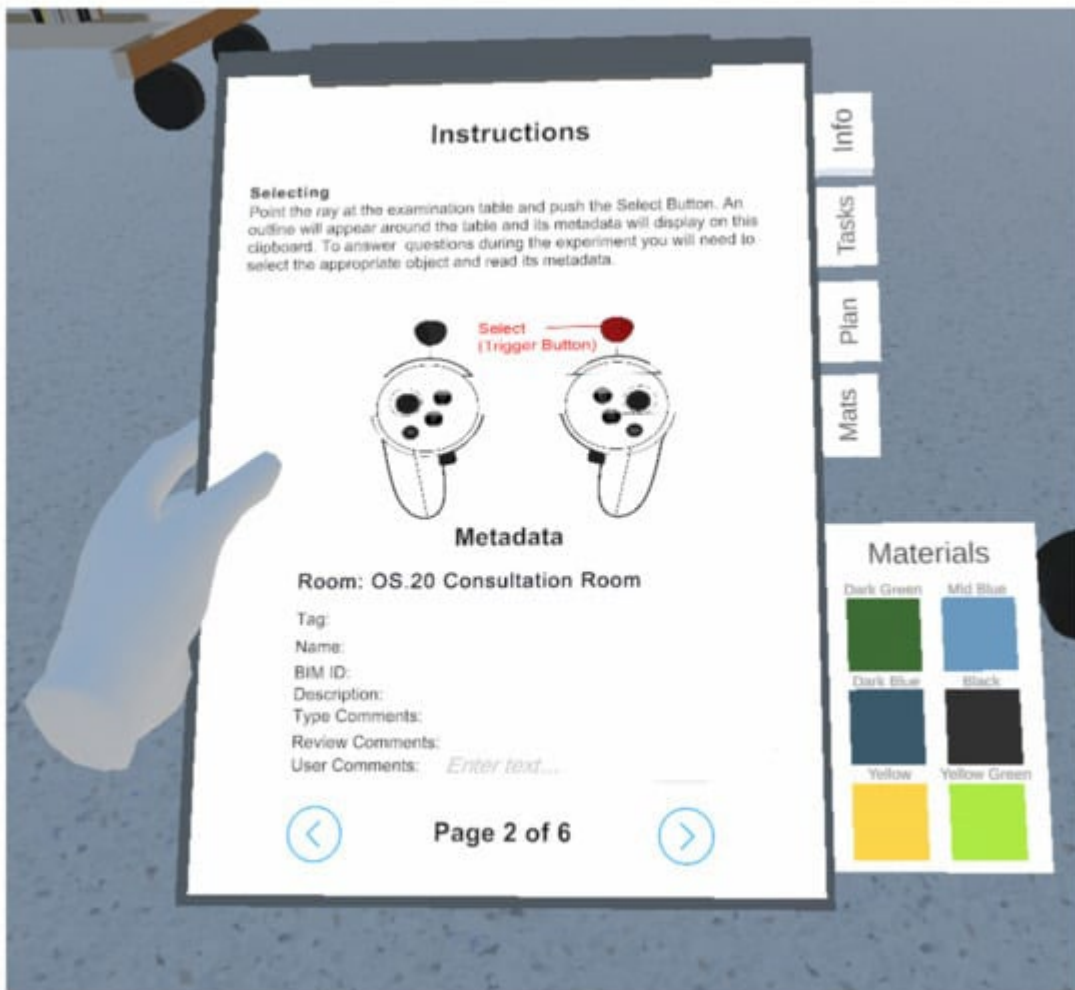


Рисунок 3. Учебный буфер обмена.

Участников также ознакомили с инструкциями на экране о том, как использовать модель Enscape, и, при необходимости, участникам показали, как использовать Adobe Acrobat Reader (см. Рисунок 4 и Рисунок 5). Когда учебные задания были выполнены и участникам была предоставлена возможность задать уточняющие вопросы, обучение заканчивалось и начинался эксперимент.



Рис. 4. Скриншот Enscape Model.



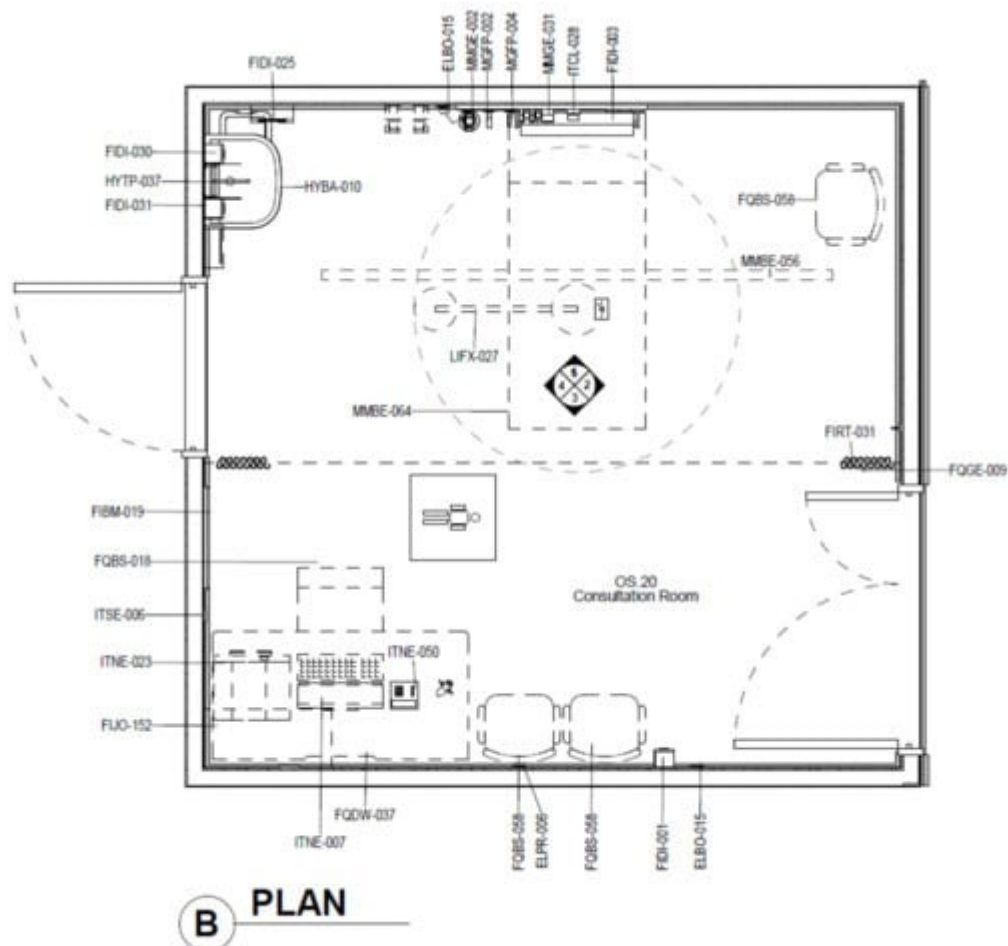


Рисунок 5. Скриншот плана в формате PDF.

Для проверки каждого состояния участникам необходимо будет выполнить специально разработанные задания и вопросы для этого состояния (см. Приложение В и Приложение С для анкет по модулю «Театр и восстановление»). Задачи, которые участникам нужно было выполнить, проверяли их понимание проекта, оценивая их способность сначала определить правильную часть оборудования, затем просмотреть и предоставить обратную связь по обзору проекта и, наконец, выявить ошибки.

Каждый вопрос требовал от участников просмотра видимой им геометрической информации, а также метаданных BIM, которые были видны либо в таблицах, либо в буфере обмена. Каждый вопрос начинался с номера и названия комнаты, в которой находился соответствующий объект, чтобы помочь участнику найти нужную информацию. Последней задачей каждого условия было составить список всех кодовых слов, найденных в ходе эксперимента. Внутри каждого модуля в каждом условии были детские игрушки, размещенные в необычных местах с кодовыми словами в метаданных (см. рисунок б). Это было сделано для того, чтобы проверить, заметят ли участники очевидные ошибки и исследуют ли дизайн за пределами структурированного обзора.



Рис. 6. Детская игрушка со связанным кодовым словом (не видно на рисунке) в ее метаданных.

Задачи, изложенные выше, призваны ответить на вопрос, улучшит ли использование виртуальной реальности для просмотра метаданных BIM понимание архитектурного проектирования по сравнению с традиционными формами коммуникации при проектировании, путем оценки того, насколько хорошо участники поняли проект в двух разных условиях. Участники также должны были помочь нам ответить, повысит ли использование виртуальной реальности для просмотра метаданных BIM эффективность анализа архитектурного проекта по сравнению с традиционными формами коммуникации при проектировании. Измерив, сколько задач участник выполняет правильно и в какие сроки, мы сможем ответить, была ли проверка дизайна более эффективной в VR, чем при использовании традиционной проверки дизайна.

В конце каждого условия участники также должны были заполнить анкету SUS (см. Приложение D) и ответить на шесть дополнительных вопросов, призванных раскрыть информацию о выполненных заданиях (см. Приложение E). Затем участники повторяли описанную выше процедуру в других условиях.

Наконец, после того, как участники рассмотрели оба условия в конце эксперимента, было проведено краткое структурированное интервью. Участникам задавались вопросы, что им нравится и не нравится в каждом из режимов, а также какое состояние они предпочитают. Им также была предоставлена возможность оставить отзыв или высказать свое мнение. у комментарии по любому из условий. Интервью записывались, расшифровывались, а затем анализировались на предмет закономерностей/тем/согласованностей. Вопросы были призваны выявить основные предпочтения и определить, что участники предпочитают в каждом из условий, а также что они считают наиболее проблематичным.

Результаты интервью, а также оценки SUS и данные анкеты после проверки помогут нам определить, какие условия участники сочли более удобными для использования, что позволит нам ответить, повысит ли использование виртуальной реальности для просмотра метаданных BIM удобство использования. инструмент проверки архитектурного проекта по сравнению с традиционными формами коммуникации в области дизайна. Обратитесь к рисунку 7 для обзора экспериментальной установки.

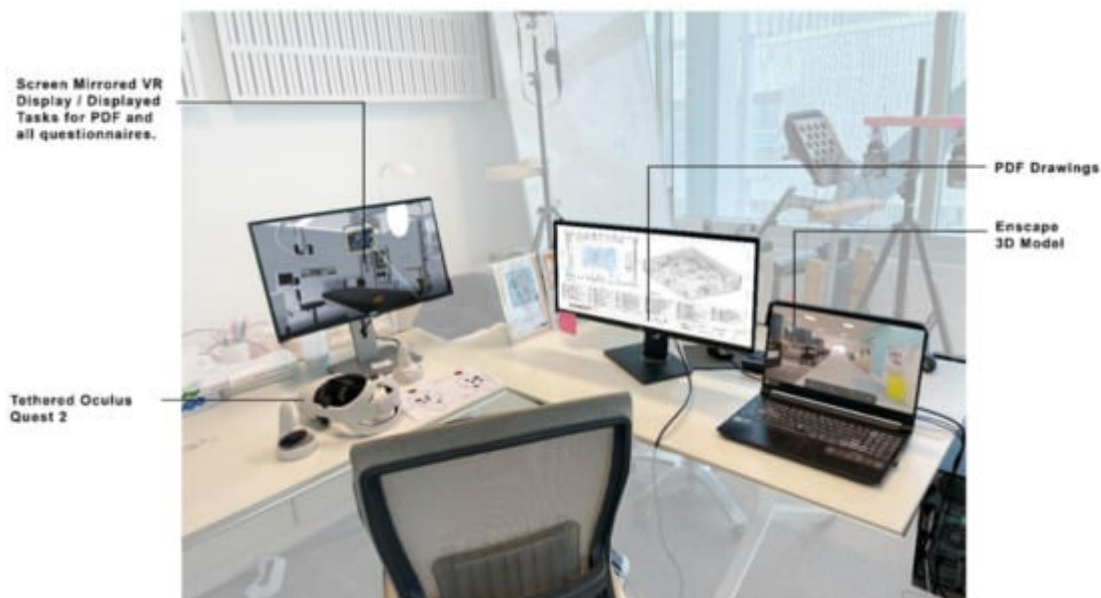


Рис. 7. Схема эксперимента.

## 4. Результаты

### 4.1. Участники

Участники исследования пользователей должны были иметь опыт работы в сфере здравоохранения. Двадцать участников подписались на участие в исследовании пользователей; однако из-за непредвиденных обстоятельств принять участие смогли только семнадцать. Профессии участников были разными и представляли собой разнообразный опыт. Среди участников были как выпускники первого курса, так и опытные специалисты с опытом работы более 10 лет. Области также были разными: в них приняли участие фармацевты, физиотерапевты, медсестры, врачи общей практики, аудиологи и регистраторы. Среди 17 участников были 4 (24%) мужчины и 13 (76%) женщин. Все участники имели нормальное или скорректированное до нормального зрение. 11 участников никогда раньше не использовали шлемы виртуальной реальности, а остальные 6 использовали виртуальную реальность пару раз в год. Участников также спросили, просматривали ли они когда-либо архитектурные планы; Это сделали 4 из 17 участников. Участники были разного возраста; семь участников были в возрасте от 35 до 50 лет, шесть были в возрасте от 25 до 34 лет, двое были в возрасте от 18 до 24 лет, один был в возрасте 51–64 лет и один был старше 65 лет. Все участники завершили эксперимент, и никто из участников не завершил эксперимент. сообщили о каких-либо ощущениях киберболезни.

### 4.2. Результаты задачи

В целом участники добились большего успеха в условиях VR: больше участников получили больше правильных ответов. Критерий знаковых рангов Уилкоксона показал, что участники набрали статистически значимо более высокие баллы в состоянии VR ( $Z = -2,334$ ,  $p = 0,020$ ). Состояние VR имело общее среднее значение 7,00 ( $SD = 1,32$ ), тогда как состояние PDF имело общее среднее значение 5,29 ( $SD = 1,86$ ). Это на 32% больше, чем в формате PDF.

Из 17 участников 11 (64,7%) выполнили больше заданий правильно в состоянии VR, а 4 (24,3%) выполнили больше заданий правильно в состоянии PDF. Два участника получили одинаковый балл между VR и PDF (11,7%).

Первый вопрос в каждом условии был разработан для проверки способности участников выявлять ошибки между предлагаемым дизайном и требованиями, перечисленными в

метаданных. Дизайн оказался правильным, и только прочитав метаданные, участники смогли обнаружить ошибку. В общей сложности 22% участников, проверявших дизайн в формате PDF, ответили правильно, по сравнению с 75% участников в VR. Аналогичным образом, в модуле «Восстановление» участников спрашивали, сколько умывальников необходимо. В предлагаемом проекте был только один бассейн, в то время как в метаданных указано, что на каждые 4 койки должен быть 1 бассейн, а при 7 койках в проекте фактически требовалось 2 бассейна. 25 % участников, просматривавших условие PDF, поняли это правильно, а 100 % участников поняли это правильно в VR.

Последний вопрос в каждом условии касался кодовых слов в метаданных BIM игрушек, расположенных вокруг каждого модуля. Это было сделано для того, чтобы проверить, найдут ли участники какие-либо очевидные ошибки или будут ли они строго отвечать на задания. Два участника в состоянии VR нашли их во время эксперимента. Один из участников, обнаруживших его в состоянии VR, специально спросил, могут ли они отказаться от задания и просто «исследовать». Когда они это сделали, они нашли несколько кодовых слов и вошли в комнаты, в которых не было никаких конкретных задач, которые им нужно было выполнить.

### 4.3. Затраченное время

Количество времени, которое потратил каждый участник, значительно различалось. В состоянии VR самое быстрое время составило 9 минут 5 секунд. Наименьшее время выполнения условия PDF составило 12 мин 40 с. Самое продолжительное время VR составило 21 минуту и 5 с, а самое продолжительное время в PDF — 35 минут и 3 с. Среднее время в VR составило 15 минут 45 с, а среднее время в PDF — 22 мин 46 с. На рисунке 8 ниже показано, сколько времени потребовалось каждому участнику для выполнения заданий. Время выполнения задачи было преобразовано в секунды, и для определения значимости цифр был проведён критерий знакового ранга Уилкоксона. При  $Z = -2,864$  и  $p = 0,004$  разница во времени была статистически значимой.



Рис. 8. Общее время выполнения задачи.

#### 4.4. Результаты SUS

Состояние VR также получило значительно более высокие оценки в опросе SUS: средний балл SUS составил 78,70 (SD = 10,65) по сравнению с 38,67 (SD = 19,31) для состояния PDF и 3D-модели. Принятый «проходящий» SUS балл считался равным 68 [30], и поэтому только состояние VR считалось проходящим. Был проведен знаково-ранговый критерий Уилкоксона, который показал статистическую значимость результатов SUS с  $Z = -3,624$ ,  $p = 0,001$ . Самый низкий балл SUS для состояния PDF составил 5, а самый низкий для VR — 62,5. Самый высокий балл PDF составил 67,5, а самый высокий балл VR — 97,5. На рисунке 9 представлен график оценок SUS.

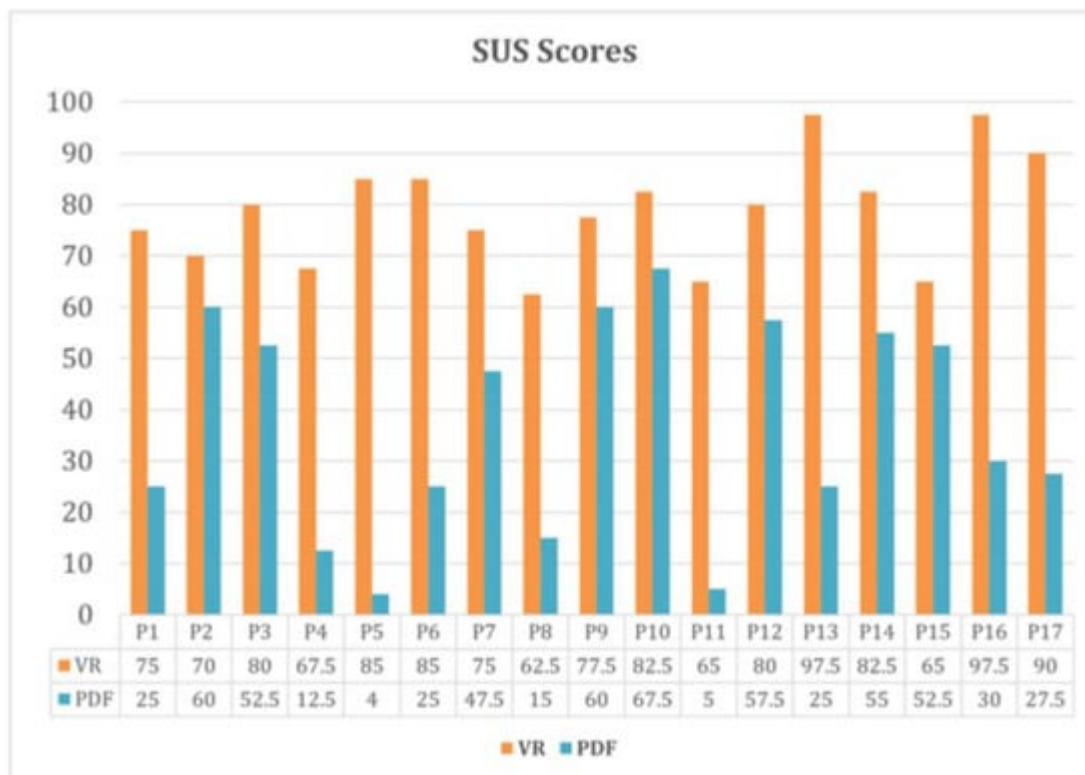


Рис. 9. Расчетные баллы SUS по участникам.

#### 4.5. Результаты анкеты после обзора

После того, как участники заполнили анкету SUS, им были заданы шесть других вопросов по шкале Лайкерта, в частности, касающихся условий проверки и того, как, по их мнению, они это сделали. Эти данные были собраны для того, чтобы конкретно выявить, что участники думают о различных элементах инструментов проверки проекта. Если бы мы преобразовали шкалу Лайкерта в числа, оценивая «Категорически не согласен» как 1, «Не согласен» как 2 и т. д. и «Совершенно согласен» как 5, мы могли бы получить средний балл по каждому вопросу. Это показано на рисунке 10.

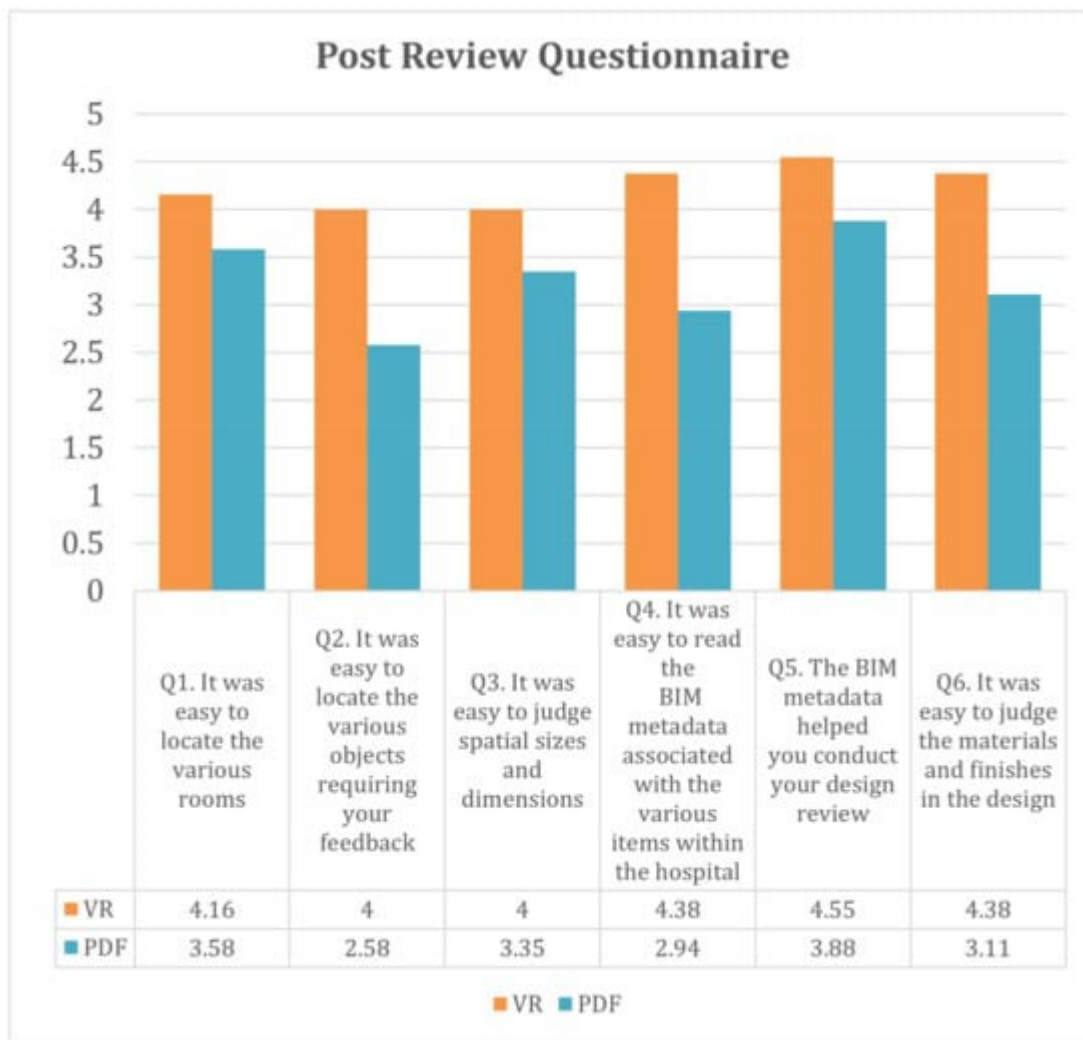


Рис. 10. Результаты анкеты после проверки.

Разбивая ответы на вопросы, мы видим, что в четвертом вопросе наблюдается самая большая разница в ответах, что позволяет предположить, что участники, по крайней мере, воспринимали просмотр метаданных в виртуальной реальности как более простой, чем PDF. Следующая по величине разница в ответах была обнаружена во втором квартале; найти различные объекты, требующие вашей обратной связи, было легко, и здесь оценка VR снова оказалась выше. В каждом вопросе состояние VR получило более высокую оценку. Самый близкий рейтинг был найден в первом квартале: найти разные комнаты было легко. Это удивительно, поскольку условие VR требовало от участников исследовать пространство, чтобы найти комнаты, в то время как условие PDF содержало оглавление с закладками, позволяющее участникам переходить непосредственно в каждую комнату.

#### 4.6. Результаты интервью

Был проведен тематический анализ интервью. В интервью 16 из 17 участников выбрали VR в качестве предпочтительного условия проверки дизайна. Причины, по которым они выбрали VR, были разными, но придерживались единых тем. Семь участников отметили, что VR облегчила визуализацию дизайна, а четыре участника отметили, что VR более удобен для пользователя. Другие причины заключались в том, что к информации было легче получить доступ, двум участникам понравился характер условия VR «укажи и щелкни», а другому участнику понравилось, как можно отслеживать комментарии между обзорами (это было общим для обоих условий). Один участник предпочел виртуальную реальность из-за практического аспекта. Человек, выбравший PDF, отметил, что, хотя его и сложнее использовать, он считает, что PDF содержит гораздо больше технической информации.

Участников спросили, что им понравилось и что не понравилось в каждом условии. В состоянии VR пять участников отметили, что это было похоже на возвращение в больницу; они «чувствовали себя как в комнате». Участники отметили, что использовать виртуальную реальность проще. Четверо участников отметили, что это облегчило визуализацию пространства. Три участника особо отметили, что доступ к метаданным стал проще. Два человека упомянули, что они могли просто «указать и щелкнуть» и мгновенно увидеть метаданные, а другие участники отметили, что это было проще, потому что «не слишком много информации появлялось одновременно».

## 5. Обсуждение

Результаты показали явное предпочтение VR над состоянием PDF. В ходе интервью участники отметили, что в VR найти предметы гораздо проще. Они также отметили, что VR более удобен и интуитивно понятен.

Результаты показали значительную разницу между двумя состояниями: VR имел более высокий средний балл 7,00 по сравнению с PDF 5,29. В среднем на правильные ответы на большее количество вопросов в VR уходило меньше времени, чем в PDF. Среднее время в VR составило 15 минут 45 с, а среднее время в PDF — 22 мин 46 с.

Результаты показывают, что VR воспринимался как более удобный вариант, чем формат PDF. Оценки SUS были значительно выше в пользу VR. В анкете после обзора по всем шести вопросам состояние VR получило более высокую оценку.

Участники в состоянии VR правильно выполнили больше задач за более короткое время. Результаты интервью показали более сильное предпочтение VR по сравнению с условием модели PDF + 3D: 16 из 17 участников выбрали условие VR в качестве предпочтительного варианта. В ходе интервью участники отметили, что им гораздо проще пользоваться. Результаты опросника SUS подтверждают это, показывая статистически значимую разницу между условиями PDF и VR. Многие участники интервью (5) отметили, что доступ к метаданным в виртуальной реальности проще, а анкета после обзора также показала, что доступ к метаданным в виртуальной реальности проще. Это было подкреплено более высокой скоростью выполнения задач в условиях VR. Участники заявили в интервью и в анкете, что им легче идентифицировать предметы в VR, и это было подкреплено более высоким уровнем выполнения задач в VR и более высоким баллом SUS. Аб Эти результаты позволяют нам сделать вывод, что VR повышает эффективность обзоров проектов по сравнению с традиционными формами общения, поскольку участники обнаружили, что им проще пользоваться, они выполнили больше задач правильно и быстро и в целом предпочли этот инструмент PDF-инструменту.

Однако условие PDF имело свои преимущества. В ходе интервью несколько участников отметили, что чертежи в формате PDF оказались более точными и содержали дополнительные данные. Это интересно, поскольку условие VR и условие PDF содержали идентичные наборы данных. Им также понравилось, как элементы были закодированы между планами и расписанием, и им понравилось использовать 3D-модель Enscape.

Было интересно, как мало участников заметили или выбрали игрушки. Это были яркие предметы, которым явно не место в больничной обстановке. Также стоит отметить, что все участники, кроме одного, выполнили предписанные задания. Этот участник нашел больше кодовых слов, чем кто-либо другой. Участники, как правило, придерживались структурированных задач и не изучали модули дальше.

Как установили Сидани и др. [13], мало исследований было проведено по использованию негеометрических данных BIM в VR. Данная статья была направлена на решение этой проблемы. Другие исследования показывают, что использование планов и технической информации вместе с моделями виртуальной реальности полезно. Приведенные выше результаты в целом отражают то, что обнаружили другие исследователи: VR является полезным инструментом для анализа пространственных и геометрических данных. Однако, включив технические данные вместе с геометрией, мы смогли продемонстрировать, что VR можно использовать для проверки технических спецификаций, необходимых в проекте здравоохранения (см. рисунок 11 ниже, где показан пример метаданных в прототипе VR).



Рис. 11. Метаданные в прототипе VR.

## 6. Ограничения

Исследование проводилось в конце 2021 года в Крайстчерче, Новая Зеландия, во время пандемии COVID-19. Это повлияло на количество людей, которые могли принять участие в эксперименте, а учитывая, что участниками были медицинские работники, набрать людей было особенно сложно. Пол участников исследования был сильно искажен: 76% участников идентифицировали себя как женщины; По данным ВОЗ, 67% мирового персонала здравоохранения и социальной помощи составляют женщины [31]. Будущие исследования должны помочь решить эту проблему и попытаться привлечь участников, которые лучше отражают глобальную рабочую силу.

Экспериментатор переоценил знание участниками Adobe Acrobat Reader. Предполагалось, что они знают базовые инструменты, такие как масштабирование и следующая страница, но это не всегда так. Эта проблема была обнаружена на обучающем этапе эксперимента, поэтому экспериментатор смог ее исправить, тщательно объяснив, как использовать необходимый инструмент. Однако, если эксперимент придется повторить, следует рассмотреть более структурированное и формальное руководство по использованию Adobe Reader.

Было рассмотрено только два разных проекта, и разница в скорости выполнения задач позволяет предположить, что они были разной сложности. Дальнейшие разработки должны



сознательно учитывать сложность конструкции и тестироваться на различных сложных конструкциях. Хотя два разных модуля были спроектированы так, чтобы иметь одинаковую сложность, результаты выполнения задания показали, что это не так.

Для ввода метаданных использовался Autodesk Revit, поскольку автор знаком с этой программой. Следует отметить, что другие пакеты программного обеспечения AEC также предлагают эту возможность.

Unity Reflect использовался для анализа метаданных из Revit в игровой движок Unity. Это дорогой плагин, который может стать препятствием для многих архитектурных фирм. Однако существуют альтернативы, которые достигают аналогичных результатов, в частности Datasmith, который подключается к Unreal Game Engine и позволяет переносить метаданные из Revit, 3DS Max, Sketchup и Archicad в игровой движок (<https://www.unrealengine.com/en-US/datasmith/plugins> (по состоянию на 30 мая 2023 г.)).

## 7. Выводы

В этой статье изучалось, повышает ли использование виртуальной реальности для просмотра метаданных BIM эффективность проверок архитектурного проектирования. Чтобы проверить, полезен ли просмотр проектов и метаданных BIM в VR для процесса проверки проекта, было проведено пользовательское исследование с участием 17 медицинских работников, в ходе которого участники проверяли дизайн больницы либо с помощью архитектурных чертежей в формате PDF и цифровой 3D-модели рабочего стола, либо в рамках VR-модель. Учитывая более высокий уровень выполнения задач за более короткое время в виртуальной реальности, более высокий балл SUS и отзывы в интервью, как правило, более положительные (16 из 17 участников выбрали виртуальную реальность в качестве предпочтительного условия), это исследование пришло к выводу, что да, виртуальная реальность может использоваться для просмотра метаданных BIM и может повысить эффективность проверки проектов.

Прототип, разработанный для проверки гипотез, использовался только для проведения одного этапа проверки проекта; Следующий этап проверки проекта — это рассмотрение архитектором комментариев и предложений, внесенных заинтересованными сторонами, и обновление данных. т. е. дизайн по требованию. Одним из направлений будущих исследований является проверка того, позволяет ли этот инструмент проверки проекта легко и эффективно передавать знания обратно команде разработчиков. Прототип был настроен для создания файла базы данных, который можно считать в файл Revit архитектора. Когда он считывается в конкретный чертеж, любые комментарии, сделанные к конкретному объекту, окрашивают его в ярко-красный цвет, предупреждая архитектора о запрошенном изменении. Эта часть процесса рассмотрения проекта не была включена в данное исследование по причинам его объема.

Прототип представляет собой специально созданное приложение и требует значительной настройки и настройки, чтобы довести функциональность инструмента до уровня, подходящего для проверки проекта. Хотя время, затраченное на создание второго модуля («Восстановление»), было лишь частью времени, затраченного на создание первого модуля («Театр»), для создания и сборки второго модуля все равно потребовалось около 40 часов работы. Хотя со временем будет некоторая эффективность, добавление дополнительных 40 часов работы к обзору проекта имеет важное значение, даже если есть потенциал окупить это время за счет меньшего количества изменений в проекте на более поздних стадиях проекта.

Поэтому в будущей работе необходимо изучить более автоматизированные способы создания VR-моделей, подходящих для анализа проекта, на основе доступных данных BIM.

Хотя участники выявили и исправили больше ошибок в условиях виртуальной реальности, это не было точным отражением типичного сеанса проверки проекта. Заинтересованные стороны могут быть ориентированы на известные проблемы; однако на большинстве обзорных сессий заинтересованные стороны свободно оценивают проект. Участникам этого исследования пользователей было предложено найти ошибки и идентифицировать элементы с помощью задач. Во время исследования один участник спросил, могут ли они отклониться от списка задач и просто исследовать. Этот участник нашел больше кодовых слов, чем кто-либо другой, и изучил больше модели виртуальной реальности, чем другие участники. Поэтому будущая работа должна выяснить, демонстрирует ли VR аналогичные преимущества при использовании менее структурированного или управляемого исследования пользователей, где участники могут свободно исследовать и находить ошибки самостоятельно. Тем не менее, медицинские работники, участвовавшие в этом исследовании, определили явные предпочтения, и высокая скорость выполнения задач в сочетании с более быстрым временем выполнения ясно указывает на то, что VR является более эффективным инструментом проверки дизайна.

### **Вклад автора**

*Концептуализация, Э.Б.; методология, Э.Б.; расследование, Э.Б.; курирование данных, ЕВ; надзор, Г.Л. и С.Л.; письмо – подготовка первоначального черновика, Э.Б.; написание — обзор и редактирование, Э.Б., Г.Л. и С.Л. Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.*

### **Финансирование**

*Это исследование было поддержано стипендией Фонда Ады Резерфорд (<https://www.artrust.co.nz/>) для Э.Б.*

### **Заявление Институционального наблюдательного совета**

*Исследование было одобрено Комитетом по этике человека Кентерберийского университета (ссылка: НЕС 2021/70/LR, выдано: 20 сентября 2021 г.).*

### **Заявление об информированном согласии**

*Информированное согласие было получено от всех субъектов, участвовавших в исследовании.*

### **Заявление о доступности данных**

*Наборы данных, созданные и проанализированные в ходе текущего исследования, не являются общедоступными, поскольку в заявлении по этике указано, что данные будут уничтожены через пять лет после завершения исследования.*

### **Конфликт интересов**

*Авторы объявили, что нет никаких конфликтов интересов.*

## Appendix A. Pre-Experiment Questionnaire

### Default Question Block

Q1. Age:

- 18-24
- 25-34
- 35-50
- 51-64
- 64+

Q2. Gender:

- Male
- Female
- Please specify
- Prefer not to say

Q3. How often do you use VR headsets?

- Never
- A couple of times a year
- A couple of times a month
- A couple of times a week
- Every day

Q4. How often do you play video games? Regardless of PC, console, mobile, vr platform?

- Never
- A couple of times a year
- A couple of times a month
- A couple of times a week
- Every day

Q5. Have you ever worked with an architect before and completed a design review with them? ie reviewed architectural plans and provided your comments.

- Yes
- No

Q6. Do you have normal or corrected to normal vision?

- Normal
- Correct to normal (glasses)
- Neither

## Appendix B. Theatre Questionnaire

OS.01a. Scrub & Bed Bay. Are the non-touch sensors for the taps in Scrub bay correctly integrated into the scrub sink?

- Yes
- No
- Unsure

OS.01a. Scrub & Bed Bay. What colour is the floor vinyl around the scrub sink?

- Black - Granit Safe.T
- Blue - Granit Safe.T
- Dark Blue - Granit Safe. T
- Unsure

Select a new colour from the swatches to the right. Enter the colour and product name below.

OS.01 Theatre In the previous design review, the theatre manager requested the large TV screen mounted on the wall has a direct connection to the surgical arm, which surgical arm should it be connected to?

- Surgical Pendants ID: 346593
- Surgical Pedants ID: 346641
- Light Arm ID: 346644
- Unsure

OS.01 Theatre The whiteboard mounted on the wall near the surgeons bench is a client supplied, contractor installed item. What group number is it?

- 1
- 2
- 3
- Unsure

OS.03 Sterile Store The previous design review requested the bench with the computer on it within the sterile store be changed from a standing desk to a seated desk. Confirm this has been updated and fixtures are correct. Please comment on this configuration.

OS.01 Theatre Confirm which panel was removed from the Theatre Control Panel mounted on the wall.

- CONTROL PANEL: LIGHT
- CONTROL PANEL: TOOL AIR
- ALARM PANEL
- Unsure

OS.01b Anaesthetic Prep Room Is the wall mounted mask dispenser within the anaesthetic preparation room in the correct location?

- Yes
- No
- Unsure

OS.01b Anaesthetic Prep Room How many Anaesthetic machines should there be in OS.01 Theatre and OS.01b Anaesthetic Prep. combined?

- 1
- 2
- 3
- Unsure

Thank you for completing the design review. During your review did you come across any CODEWORDS? Please enter them below;

## Appendix C. Recovery Questionnaire

Q1. OS.10 Recovery. How many handwashing stations are required?

- 1
- 2
- 4
- Unsure

Q2. OS.15 Staff Station and Resus Bay. What finish is the Staff Station front desk joinery

- Maple Veneer
- Walnut Veneer
- Teak Veneer
- Unsure

Q3. Select a new finish for the Staff Station from the swatches to the right. Enter the colour name below.

Q4. OS.10 Recovery. Aside from vinyl what other finish is acceptable behind the basin?

- Paint Finish
- Tile
- Glass Splashback
- Unsure

Q5. OS.13 Clean Utility. Has the Dangerous Drugs Safe been mounted correctly?

- Yes
- No
- Unsure

Q6. OS.15 Staff Station & Resus Bay. Is the Resuscitation trolley located correctly?

- Yes
- No
- Unsure

Q7. OS.14 Staff Room. Where is the Boiler / Chiller unit for the tap located?

- Under the sink
- Overhead cupboard
- Within centralised plant
- Unsure

Q8. OS.10b Patient Bay. What is the stainless steel rail behind the bed used for?

- Wall Protection
- Accessibility
- Patient Transfer
- Unsure

Q9. OS.11 Dirty Utility. What is the correct sanitiser configuration?

- Separate Utensil and Pan Sanitiser
- Pan Sanitiser Only
- 1 Combined Utensil and Pan Sanitiser
- Unsure

Q10. Thank you for completing the design review. During your review did you come across any CODEWORDS? Please enter them below;

## Appendix D. SUS VR

I think that I would like to use this VR design review tool frequently.

	Strongly Disagree	Somewhat disagree	Neither agree nor disagree	Somewhat agree	Strongly agree
Mark only one circle	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

I found this VR design review tool unnecessarily complex.

	Strongly Disagree	Somewhat disagree	Neither agree nor disagree	Somewhat agree	Strongly agree
Mark only one circle	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

I thought this VR design review tool was easy to use.

	Strongly Disagree	Somewhat disagree	Neither agree nor disagree	Somewhat agree	Strongly agree
Mark only one circle	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

I think that I would need the support of a technical person to be able to use this VR design review tool.

	Strongly Disagree	Somewhat disagree	Neither agree nor disagree	Somewhat agree	Strongly agree
Mark only one circle	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

I found the various functions in this VR design review tool were well integrated.

	Strongly Disagree	Somewhat disagree	Neither agree nor disagree	Somewhat agree	Strongly agree
Mark only one circle	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

I thought there was too much inconsistency in this VR design review tool.

	Strongly Disagree	Somewhat disagree	Neither agree nor disagree	Somewhat agree	Strongly agree
Mark only one circle	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

I would imagine that most people would learn to use this VR design review tool very quickly.

	Strongly Disagree	Somewhat disagree	Neither agree nor disagree	Somewhat agree	Strongly agree
Mark only one circle	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

I found the VR design review tool very cumbersome to use.

	Strongly Disagree	Somewhat disagree	Neither agree nor disagree	Somewhat agree	Strongly agree
Mark only one circle	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

I felt very confident using this VR design review tool.

	Strongly Disagree	Somewhat disagree	Neither agree nor disagree	Somewhat agree	Strongly agree
Mark only one circle	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

I needed to learn a lot of things before I could get going with this VR design review tool.

	Strongly Disagree	Somewhat disagree	Neither agree nor disagree	Somewhat agree	Strongly agree
Mark only one circle	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

## Appendix E. Post Review Questionnaire

1. It was easy to locate the various rooms.

Strongly Disagree	Disagree	Neutral	Agree	Strongly Agree
1	2	3	4	5

2. It was easy to locate the various objects requiring your feedback.

Strongly Disagree	Disagree	Neutral	Agree	Strongly Agree
1	2	3	4	5

3. It was easy to judge spatial sizes and dimensions.

Strongly Disagree	Disagree	Neutral	Agree	Strongly Agree
1	2	3	4	5

4. It was it easy to read the BIM metadata associated with the various items within the hospital

Strongly Disagree	Disagree	Neutral	Agree	Strongly Agree
1	2	3	4	5

5. The BIM metadata helped you conduct your design review.

Strongly Disagree	Disagree	Neutral	Agree	Strongly Agree
1	2	3	4	5

## References

1. McKinsey Global Institute. *Reinventing Construction: A Route to Higher Productivity*; McKinsey & Company: Brussels, Belgium, 2017; Available online: <https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/business%20functions/operations/our%20insights/reinventing%20construction%20through%20a%20productivity%20revolution/mgi-reinventing-construction-a-route-to-higher-productivity-full-report.pdf> (accessed on 28 May 2023).
2. Sacks, R.; Eastman, C.; Lee, G.; Teicholz, P. *BIM Handbook. A Guide to Building Information Modelling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers*, 3rd ed.; John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA, 2018. [[Google Scholar](#)]
3. Chen, X.; Chang-Richards, A.Y.; Pelosi, A.; Jia, Y.; Shen, X.; Siddiqui, M.K.; Yang, N. Implementation of technologies in the construction industry: A systematic review. *Eng. Constr. Archit. Manag.* 2022, *29*, 3181–3209. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
4. Liu, Y. Evaluating Design Review Meetings and the Use of Virtual Reality for Post-Occupancy Analysis. Ph.D. Thesis, Penn State University, State College, PA, USA, 2016. [[Google Scholar](#)]
5. Shen, W.; Zhang, X.; Shen, G.Q.; Fernando, T. The user pre-occupancy evaluation method in designer-client communication in early design stage: A case study. *Autom. Constr.* 2013, *32*, 112–124. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
6. Gallaher, M.P.; O'Connor, A.C.; Dettbarn, J.L., Jr.; Gilday, L.T. *Cost Analysis of Inadequate Interoperability in the U.S. Capital Facilities Industry-Final Report*; National Institute of Standards and Technology (NIST): Gaithersburg, MD, USA, 2004. [[Google Scholar](#)]
7. Lin, Y.; Chen, Y.; Yien, H.; Huang, C.; Su, Y. Integrated BIM, game engine and VR technologies for healthcare design: A case study in cancer hospital. *Adv. Eng. Inform.* 2018, *36*, 130–145. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
8. Codinoto, R.; Tzortzopoulos, P.; Kagioglou, M.; Aouad, G.; Cooper, R. The impacts of the built environment on health outcomes. *Facilities* 2009, *27*, 138–151. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
9. Elf, M.; Anåker, A.; Marcheschi, E.; Sigurjónsson, Á.; Ulrich, R.S. The built environment and its impact on health outcomes and experiences of patients, significant others and staff—A protocol for a systematic review. *Nurs. Open* 2020, *7*, 895–899. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
10. Joseph, A.; Bayramzadeh, S.; Zamani, Z.; Rostenberg, B. Safety, Performance, and Satisfaction Outcomes in the Operating Room: A Literature Review. *HERD Health Environ. Res. Des. J.* 2018, *11*, 137–150. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
11. Joupila, T.; Tiainen, T. Nurses' Participation in the Design of an Intensive Care Unit: The Use of Virtual Mock-Ups. *HERD Health Environ. Res. Des. J.* 2021, *14*, 301–312. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
12. Buchanan, E.; Loporcaro, G.; Lukosch, S. On the Effectiveness of Conveying BIM Metadata in VR Design Reviews for Healthcare Architecture. In Proceedings of the 2022 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops (VRW), Christchurch, New Zealand, 12–16 March 2022; pp. 806–807. [[Google Scholar](#)]
13. Sidani, A.; Dinis, F.M.; Sanhudo, L.P.; Duarte, J.; Santos Baptista, J.; Poças Martins, J.; Soeiro, A.A. Recent Tools and Techniques of BIM-Based Virtual Reality: A Systematic Review. *Arch. Comput. Methods Eng.* 2019, *28*, 449–462. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
14. Brooke, J. SUS: A retrospective. *J. Usability Stud.* 2013, *8*, 29–40. [[Google Scholar](#)]
15. Liu, Y.; Messner, J.; Leicht, R. A process model for usability and maintainability design reviews. *Archit. Eng. Des. Manag.* 2018, *14*, 457–469. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
16. Kiviniemi, A. *Requirements Management Interface to Building Product Models; CIFE Technical Report No. 161*; Stanford University: Stanford, CA, USA, 2005. [[Google Scholar](#)]
17. Wingler, D.; Machry, H.; Bayramzadeh, S.; Joseph, A.; Allison, D. Comparing the Effectiveness of Four Different Design Media in Communicating Desired Performance Outcomes with Clinical End Users. *HERD Health Environ. Res. Des. J.* 2019, *12*, 87–99. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]



18. Bayramzadeh, S.; Joseph, A.; Allison, D.; Shultz, J.; Abernathy, J.; RIPCHD.OR Study Group. Using an integrative mock-up simulation approach for evidence-based evaluation of operating room design prototypes. *Appl. Ergon.* 2018, *70*, 288–299. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
19. Svidt, K.; Sørensen, J.B. Development of a Virtual Reality Solution for End User Involvement in Interior Design. In Proceedings of the 34th International Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe (eCAADe): Complexity & Simplicity, Oulu, Finland, 22–26 August 2016; Volume 2, pp. 541–546. [[Google Scholar](#)]
20. Hoof, J.V.; Rutten, P.; Struck, C.; Huisman, E.R.; Kort, H. The integrated and evidence-based design of healthcare environments. *Archit. Eng. Des. Manag.* 2015, *11*, 243–263. [[Google Scholar](#)]
21. Caixeta, M.C.; Fabricio, M. A conceptual model for the design process of interventions in healthcare buildings: A method to improve design. *Archit. Eng. Des. Manag.* 2013, *9*, 109–195. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
22. BIM in New Zealand. *The New Zealand BIM Handbook: A Guide to Enabling BIM on Built Assets 2019*, 3rd ed.; BIM in New Zealand: Auckland, New Zealand, 2019; Available online: <https://static1.squarespace.com/static/57390d2c8259b53089bcf066/t/5ce3de1e4dee7c000105cb90/1558437414375/NZ-BIM-Handbook-May-19.pdf> (accessed on 28 May 2023).
23. Alizadehsalehi, S.; Hadavi, A.; Huang, J.C. From BIM to extended reality in AEC industry. *Autom. Constr.* 2020, *116*, 103254. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
24. Shen, W.; Shen, Q.; Zhong, X. A user pre-occupancy evaluation method for facilitating the designer-client communication. *Facilities* 2012, *30*, 302–323. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
25. Joseph, A.; Browning, M.H.E.M.; Jiang, S. Using Immersive Virtual Environments (IVEs) to Conduct Environmental Design Research: A Primer and Decision Framework. *HERD Health Environ. Res. Des. J.* 2020, *13*, 11–25. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
26. Leicht, R.M.; Abdelkarim, P.M.; Messner, J.I. Gaining end user involvement through virtual reality mock-ups: A medical facility case study. *Proc. CIB W* 2010, *78*, 2010. [[Google Scholar](#)]
27. Liu, Y.; Castronovo, F.; Messner, J.; Leicht, R. Evaluating the Impact of Virtual Reality on Design Review Meetings. *J. Comput. Civ. Eng.* 2020, *34*, 04019045. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)]
28. Wingler, D.; Joseph, A.; Bayramzadeh, S.; Robb, A. Using Virtual Reality to Compare Design Alternatives Using Subjective and Objective Evaluation Methods. *HERD Health Environ. Res. Des. J.* 2020, *13*, 129–144. [[Google Scholar](#)] [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
29. Australasian Healthcare Facility Guidelines. Operating Unit. Available online: <https://healthfacilityguidelines.com.au/hpu/operating-unit-1> (accessed on 4 August 2018).
30. Sauro, J.; Lewis, J.R. Quantifying the User Experience: Practical Statistics for User Research, 2nd ed. Morgan Kaufmann: Cambridge, MA, USA, 2016. [[Google Scholar](#)]
31. Value Gender and Equity in the Global Health Workforce. Available online: <https://www.who.int/activities/value-gender-and-equity-in-the-global-health-workforce#:~:text=Women%20account%20for%2067%25%20of,around%205%20billion%20people%20worldwide> (accessed on 28 May 2023).