

Анализ киберукачивания при погружении и перемещении в виртуальной реальности

Д.А. Копченова

Аннотация - На данный момент технологии виртуальной реальности (VR) все чаще используют для решения задач в различных областях. В условиях широкого распространения данной технологии и доступности её обычным пользователям, многие столкнулись с проблемой плохой переносимости (или даже непереносимости) VR технологий. Следует выделить один из основных факторов, провоцирующих киберукачивание - перемещение в виртуальной реальности VLT - виртуальная локомоция. Есть необходимость настраивать приложение для широкого круга пользователей по ряду технических параметров - сформированных для отдельно взятого пользователя или группы пользователей.

В работе рассмотрены основные методы локомоции, такие как плавное движение джойстиком и мгновенная телепортация. Рассматриваются гипотезы существующей связи между уровнем субъективного дискомфорта после выполнения базовых действий в VR и выраженностью дискомфорта, связанного с падением FPS. Проведён анализ дискомфорта группы пользователей и определение действий, вызывающих наибольший дискомфорт. Проведение данного анализа позволяет установить наиболее значимые факторы (контрольные точки) дискомфорта, определить параметры, усиливающие уровень дискомфорта в паре с другим фактором, что в следствие позволяет сформировать более чёткие рекомендации для разрабатываемого приложения. Также был проведён корреляционный анализ между уровнем дискомфорта, связанным с перемещением, и уровнем дискомфорта при снижении FPS. Полученные данные показывают, что разные выборки пользователей реагируют на виртуальную реальность по-разному.

Ключевые слова - киберукачивание, виртуальная реальность, VR, уровень переносимости VR, Oculus Quest 2, методы перемещения в VR, FPS, экспериментальное программно-аппаратное решение.

I. ВВЕДЕНИЕ

Технологии виртуальной реальности всё больше внедряют в различные сферы для обучения персонала, повышения квалификации и моделирования рабочих ситуаций. Активное внедрение VR-тренажеров осуществляется в такие области, как:

- промышленность и энергетика, где VR используют для подготовки специалистов по обслуживанию газотранспортных систем, отработки аварийных ситуаций без риска для жизни и здоровья людей, а также сохранности оборудования;
- авиация, для создания VR-тренажеров при подготовке пилотов гражданской авиации;
- медицина, медицинские вузы (Сеченовский университет) используют VR-тренажеры для обучения хирургии, диагностики и оказания первой помощи; виртуальную и дополненную реальность используют для дополнительной визуализации проведённых

исследований;

- образование и профессиональная подготовка, при обучении технологиям VR, и их использовании в педагогической практике;

- многие другие.

Первыми прототипами тренажёров виртуальной реальности принято считать симуляторы и тренажеры, разрабатываемые для авиационных и космических направлений. Целевой аудиторией данных тренажёров являлись люди, прошедшие строгий отбор и обладавшие такими характеристиками как: высокий уровень устойчивости вестибулярного аппарата, отличное физическое здоровье, психологическую устойчивость и устойчивость к перегрузкам. Всё это говорило о том, что испытуемые-пользователи были достаточно устойчивы к различным испытаниям.

Развитие и массовое распространение технологий виртуальной реальности привело к тому, что тренажеры, имитирующие движение, перестали использоваться исключительно пользователями, обладающими необходимой физической и психологической подготовкой. Это привело к тому, что значительная часть новых пользователей столкнулась с такими негативными явлениями, как киберукачивание или даже непереносимость виртуальной реальности.

Киберукачивание может быть вызвано различными факторами – техническими, индивидуальными и другими. Актуальной задачей является определение уровня переносимости VR технологий путём тестирования пользователя с использованием технически оптимизированного приложения для того, чтобы исключить фактор технических проблем. Далее необходимо осуществить подбор индивидуальных параметров, которые также влияют на уровень киберукачивания, что позволит снизить эффект киберукачивания. К параметрам, которые требуют определённого подбора следует отнести: метод перемещения (локомоция) и скорость перемещения пользователя в VR.

То, с чем раньше сталкивались единицы, стало массовой проблемой, связанной с адаптацией организма к виртуальной среде. На данный момент нет единой методики, которая позволяла бы оценивать уровень переносимости виртуальной реальности и формировать индивидуальные параметры программного обеспечения, направленные на группы пользователей приложения.

Работа посвящена решению актуальной задачи разработки методического обеспечения программно-аппаратных средств реализации систем виртуальной реальности, для оценки уровня переносимости пользователем виртуальной реальности, а также подбором параметров для уменьшения эффекта

киберукачивания в определенной группе пользователей.

В 1975 году были подробно описаны причины возникновения укачивания авторами Reason J. T. и Brand J. J., которые далее более подробно рассматривались в других статьях [1-5]. Reason J. T. и Brand J. J. заложили теория сенсорного конфликта, которая объясняла причины укачивания [6,7]. В будущем данное направление было развито в 1995 году в работе «Simulator Sickness in Virtual Environments» автора Kolasinski E. M. [8]. В работе рассматриваются причины возникновения дискомфорта, такие как сенсорный конфликт между зрительной и вестибулярной системами, влияние технических параметров VR, такие как латентность, частота кадров, а также индивидуальные различия пользователей. В данной статье автор анализирует методы диагностики, включая опросник SSQ, стратегии снижения симптомов и влияние симуляторной болезни на эффективность обучения в военных тренажерах, предлагая рекомендации по улучшению взаимодействия с виртуальными средами.

В 1993 году M. Kennedy и его коллегами был разработан опросник для оценки степени выраженности симптомов симуляторной болезни – киберукачивания [9]. Данный опросник до сих пор широко используется в исследованиях и на практике.

Большое количество исследований по техническому параметру -задержки дисплеев и их влиянию на киберболезнь, было проведено Moss J.D [10,11].

Однако, ориентированность на популяционную выборку (профессиональную, возрастную, с ограниченными возможностями и т.д.) средств реализации VR в исследованиях отсутствуют.

Метод перемещения в VR-приложениях является одним из ключевых факторов, влияющих на комфорт пользователя. Очень часто пользователи сталкиваются с проблемой, когда визуальные данные не совпадают с реальными движениями тела, создавая тем самым конфликт между зрительной и вестибулярной системой. Данный конфликт в последствие является причиной возникновения киберукачивания. Существует большое количество различных методов перемещения в VR среде, которые направлены на повышение качества восприятия VR-среды и формирование максимально реалистичного ощущения присутствия.

Ещё одной важной составляющей, которая может усиливать эффект киберукачивания является использование анимацией с высокой визуальной интенсивностью. Большое количество динамических объектов, резкие изменения освещения, эффекты размытия, вспышки и сложные шейдеры повышают нагрузку на зрительное восприятие и могут усиливать чувство дезориентации.

Также следует отметить, что такие анимации требуют значительных вычислительных ресурсов, что напрямую связано с риском снижения производительности приложения.

Частота кадров – FPS влияет на уровень дискомфорта пользователя при погружении в VR. Несоответствие между действия пользователями и

психофизиологическим восприятием возникает в том числе из-за низкой частоты кадров, так как это приводит к запаздыванию загрузки и дрожанию изображения – окружающего виртуального мира.

При высоких значениях данного показателя изображения плавно меняются и не возникает дополнительной нагрузки на глаза, а также минимизируется эффект укачивания. Высокая частота кадров позволяет более точно воспринимать объекты и движения, что в конечном итоге усиливает ощущение присутствия и реалистичность [12].

Уровень FPS является критически важным параметром при работе с VR-средой. Для VR-приложений минимально допустимым значением считается частота кадров 60 FPS. На практике стремятся достигнуть значения в диапазоне от 90 до 120 FPS, чтобы обеспечить плавность и снизить риск киберукачивания [13]. Стабильный и высокий FPS обеспечивает плавность изображения и снижает задержку между движением головы и обновлением сцены, что особенно важно для поддержания ощущения присутствия.

Перечисленные факторы являются важной составляющей при разработке VR-приложений. Анализ состояния пользователя на основе указанных показателей позволяет прогнозировать возникновение выраженного дискомфорта при снижении FPS, использовании анимаций и выборе определённого метода перемещения.

Научная новизна работы заключается в:

- разработке методики оценки влияния программно-аппаратных реализаций перемещений в VR на киберукачивание, в которой впервые вводятся уровни погружения и перемещения VR, позволяющие оценить степень дискомфорта психофизиологического восприятия группами пользователей.

- разработке методического обеспечения для выявления параметров и выбор технологий программно-аппаратного решения систем с VR, которое, в отличие от имеющихся в настоящее время, позволяет осуществлять научно-обоснованный выбор технологий снижения уровня киберукачивания для заданной группы пользователей (профессиональных групп, групп с ограничениями и т. д.);

- формировании программно-математического обеспечения анализа результатов экспериментальных исследований, позволяющее формировать технические параметры программно-технологической реализации VR для исследуемых групп пользователей, отличающиеся ориентированностью на исследования психофизиологических характеристик.

II. МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Методика включает в себя четыре этапа.

I этап. Выявление уровня переносимости VR при программно-аппаратном обеспечении, настроенном с технической точки зрения в соответствии с общими рекомендациями по снижению киберукачивания. У пользователя фиксируются: ощущение комфорта/дискомфорта.

II этап. Выявление реакции пользователя на метод перемещения (локомоции) с учетом общих рекомендаций к реализации VR-приложений. Фиксируются: ощущение комфорта/дискомфорта.

III этап. Выявление реакции на метод перемещения, который может вызвать киберукачивание.

IV этап. Определение переносимости погружения в VR с учетом постоянно меняющегося и низкого уровня FPS при взаимодействиях с локацией. Фиксируемые параметры: уровень FPS, ощущение комфорта/дискомфорта, продолжительность взаимодействия.

Данное испытание относится ко второй части общего испытания, описанного в методике [14]. Обработка первой части эксперимента была представлена в материалах статьи «Определение дискомфортных комбинаций перемещений в приложениях виртуальной реальности» [15].

Уровень дискомфорта пользователя фиксировался посредством проведения опросов после выполнения задания.

III. МЕТОДИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНО-АППАРАТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВЫЯВЛЕНИЯ КИБЕРУКАЧИВАНИЯ В ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ

Для проведения испытаний использовалось разработанное методическое и программно-аппаратное обеспечение выявления индивидуального киберукачивания в виртуальной реальности [3]. Используя разработанное ПО, пользователь погружается в виртуальную реальность, где поэтапно сталкивается базовыми типами взаимодействия, характерными для VR-среды. В рамках данной работы рассматривается только погружение на втором уровне.

Для проведения эксперимента использовалось следующее аппаратное обеспечение:

- персональный компьютер;
- VR шлем Oculus Quest 2,

Подключение к ПК осуществляется через кабельное подключение - с использованием кабеля USB-C и дополнительного ПО Oculus Link.

На рис. 1 представлена общая схема испытаний.



Рис. 1. Схема испытания

Первый уровень включает тестирование пользователя на выполнение базовых действий в VR среде, а также проверка как пользователь реагирует на различные методы поворота. Так как первый уровень не включает в себя различные технические отклонения (падение FPS), он является достаточно оптимизированным с технической точки зрения. Это говорит о том, что в случае, если пользователь испытывает дискомфорт на первом уровне – скорее всего он будет испытывать сильный дискомфорт на втором этапе.

На втором уровне перед участником стоит задача попасть в движущийся предмет. На локации реализовано два метода перемещения: плавное перемещение за счёт контроллеров и «телепортация», так же на локации представлены интенсивные визуальные эффекты (анимированные элементы). Особенностью данного уровня является тот факт, что в процессе нахождения на данном уровне, уровень кадровой частоты опускается до 5 единиц.



Рис. 2. Локация второго уровня

На данном уровне пользователь должен находиться от 3 до 7 минут.

В рамках второго уровня рассматривается: испытывает ли пользователь дискомфорт при использовании метода перемещения «телепортации», какой уровень дискомфорта испытывает при взаимодействии с анимированными элементами в VR приложении и какой уровень дискомфорта при

взаимодействии с VR средой в условиях снижения уровня FPS.

В ходе выполнения заданий пользователь отвечает на вопросы, которые позволяют зафиксировать его состояние на контрольных точках.

Задание 1 (контрольная точка 1) – пользователю необходимо изучить локацию с использованием метода перемещения «телепортация» и ответить на вопрос: какой дискомфорт испытываете после выполнения данного задания, по шкале от 0 до 8. Основной целью контрольной точки является оценка реакции пользователя на данный метод перемещения.

Задание 2 (контрольная точка 2) – пользователю необходимо перемещаться в непосредственной близости от анимаций с высокой визуальной интенсивностью и наблюдать их, при этом выполнение каких-либо дополнительных действий не требуется. Основной целью контрольной точки является оценка реакции пользователя на данные визуальные стимулы. Далее пользователь по аналогии с первой контрольной точкой отвечает на вопрос о уровне дискомфорта: какой дискомфорт испытываете после выполнения данного задания, по шкале от 0 до 8.

Задание 3 (контрольная точка 3) – в игровом процессе пользователю необходимо осуществлять стрельбу по летающему объекту. При попадании по объекту фиксируется снижение производительности (уменьшение FPS с 100 до 10).

В ходе испытания фиксировались следующие данные о результатах выполнения заданий:

- субъективная оценка уровня дискомфорта при перемещении с использованием телепортации по шкале VAS от 0 до 8;
- субъективная оценка уровня дискомфорта при наблюдении анимаций на локации по шкале VAS от 0 до 8;
- субъективная оценка уровня дискомфорта, связанного с изменением FPS (понижение FPS до 10), по шкале от 0 до 8.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ

Эксперимент проведен в соответствии с методическим обеспечением [14]. В ходе эксперимента были зафиксированы результаты опроса пользователя, относительно уровня дискомфорта по результату выполнения контрольных точек.

Опираясь на данные полученные по результатам прохождения первого и второго уровня, были сформулированы следующие гипотезы.

Была проведена проверка гипотезы существующей связи между уровнем субъективного дискомфорта в первом испытании и выраженностью дискомфорта, связанного с падением FPS.

Нулевая гипотеза: между уровнем субъективного дискомфорта в первом испытании и выраженностью дискомфорта, связанного с падением FPS, отсутствует статистически значимая связь.

Альтернативная гипотеза: существует статистически значимая связь между уровнем субъективного

дискомфорта в первом испытании и выраженностью дискомфорта, связанного с падением FPS.

При проведении анализа использовались данные сразу двух разных групп выборок (59 участников). В первую группу участников вошли студенты второго курса, а как вторую представляли студенты первых курсов.

Уровень общего дискомфорта пользователя на первом уровне рассчитывался из значений, зафиксированных на 11 контрольных точках. На их основе для каждого участника вычислялась суммарная и усреднённая величина дискомфорта.

В качестве независимого параметра использовалось значение FPS. Далее проводился корреляционный анализ между агрегированным показателем субъективного дискомфорта и значением FPS. Для оценки связи применялась корреляция Спирмена.

Корреляционный анализ Спирмена выявил слабую статистически значимую положительную связь между уровнем субъективного дискомфорта в первом испытании и субъективной оценкой дискомфорта, связанного с падением FPS - $\rho = 0.291$, $p = 0.0267$. Полученные результаты указывают на повышенную чувствительность пользователей с низкой переносимостью VR к данному параметру.

Таким образом, нулевая гипотеза об отсутствии связи между уровнем дискомфорта и FPS отвергается, а альтернативная гипотеза о наличии статистически значимой связи поддерживается данными.

Далее был проведён анализ дискомфорта группы пользователей.

Полученные данные позволяют так же провести анализ дискомфорта группы пользователей. В ходе анализа рассматриваются такие параметры приложения как: использование телепортации как метода перемещения, большого количества анимаций и сниженный уровень FPS (частоты кадров).

Рассмотрение реакции пользователей на данные параметры приложения, позволяет определить в какой степени пользователи различают данные компоненты испытания, а также определить, какой из них вносит наибольший вклад в общее ощущение дискомфорта.

Использовался комбинированный метод анализа данных, включающий методы корреляционного и сравнительного анализа. Для оценки степени взаимосвязанности оценок дискомфорта (уровень дискомфорта при использовании телепортации, взаимодействия с анимацией, падения FPS) используется корреляция Спирмена.

Для определения испытания, которое вызывает наибольший дискомфорт для заданной группы пользователей, используется парный t-тест. Данный анализ позволяет установить наиболее значимые факторы (контрольные точки) дискомфорта, определить какие параметры усиливают уровень дискомфорта в паре с другими, а также сформировать более чёткие рекомендации для разрабатываемого приложения.

Каждая группа пользователей анализировать по отдельности (табл. 1).

Таблица 1. Результаты опроса

Тип действия	Кол-во участников (%) первой выборки, отметивших дискомфорт	Кол-во участников (%) второй выборки, отметивших дискомфорт
FPS	19 (70%)	16 (51%)
Метод перемещения «телепортация»	3 (11%)	3 (22%)
Взаимодействие с анимациями	0	24 (77%)

В первой анализируемой группе дискомфорт был выражен преимущественно за счёт параметра - пониженной частоты кадров. Среди 27 участников испытания лишь 3 участника (11%) испытывали дискомфорт при использовании «телепортации» как метода перемещения, 19 участников (70%) отметили дискомфорт от изменения уровня FPS. В рамках данной группы никто из пользователей не отметил дискомфорта при взаимодействии с анимациями.

Вторая группа пользователей оказалась более чувствительной к взаимодействию с анимациями и выбору метода перемещения. Из 31 участника: 7 участников (22%) указывали на дискомфорт при использовании метода «телепортации», 16 пользователей (51%) отметили дискомфорт при взаимодействии с анимацией и 24 пользователя (77%) указали на дискомфорт при снижении уровня FPS. Как и в предыдущей группе пользователей, наибольший уровень дискомфорта пользователи испытывали при снижении уровня FPS.

Средний уровень дискомфорта, связанного с FPS, составил 1.19 балла, что существенно превышает показатели для других аспектов взаимодействия. Средний уровень дискомфорта от перемещения составил 0.11.

Отсутствие дискомфорта, связанного с взаимодействием с анимацией, не позволило провести корреляционный анализ для данного показателя. Полученное нулевое значение дискомфорта по данному параметру указывает на то, что данный параметр не вызывал выраженного дискомфорта для данной выборки пользователей и может быть использован в дальнейшем при разработке.

Также был проведён корреляционный анализ между уровнем дискомфорта, связанным с перемещением, и уровнем дискомфорта при снижении FPS. Уровень корреляции оказался слабым и статистически незначимым: $\rho = 0.16$ – связь очень слабая, $p_adj = 1.00$ - никакой статистически значимой связи нет. Это говорит об отсутствии выраженной связи между параметрами.

Далее было проведено сравнение средних уровней дискомфорта. Дискомфорт от FPS оказался значительно выше, чем от перемещения: $t = -5.39$, $p_adj = 2.39 \times 10^{-5}$; Wilcoxon: $p_adj = 3.0 \times 10^{-4}$.

Полученные результаты показали наличие выраженных различий между сравниваемыми условиями. Значение парного t-теста - $t = -5.39$, указывает на существенную разницу средних уровней дискомфорта. Скорректированное p-значение - $p_adj = 2.39 \times 10^{-5}$, говорит о том, что обнаруженное различие с крайне низкой вероятностью могло возникнуть случайно и является статистически значимым. Дополнительно был рассчитан критерий Уилкоксона,

где также было получено статистически значимое значение - $p_adj = 3.0 \times 10^{-4}$. Это указывает на устойчивость выявленного эффекта вне зависимости от предположений о распределении данных.

Для оценки величины эффекта различий рассчитывался показатель Cohen's d, который составил -1.04 . Полученное значение говорит о том, что разница между параметрами сильная и хорошо выраженная.

Аналогичным образом рассчитывались различия между FPS и анимациями. Были получены довольно высокие значения $t = -5.93$, $p_adj = 8.93 \times 10^{-6}$, Wilcoxon: $p_adj = 3.0 \times 10^{-4}$, Cohen's d = -1.14 .

Различие между перемещением и анимациями не достигло статистической значимости: $t = 1.80$, $p_adj = 0.083$; Wilcoxon: $p_adj = 0.083$, что ещё раз говорит о слабом вкладе обоих факторов в общий уровень дискомфорта.

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что данная группа пользователей испытывала выраженный дискомфорт лишь при снижении FPS. Данный параметр следует рассматривать как один из ключевых источников дискомфорта для данной группы пользователей.

Далее по аналогии были рассмотрены значения по второй группе пользователей.

Средний уровень дискомфорта, связанного с FPS, составил 1.94 балла, что превышает как дискомфорт от анимаций, который составил 0.94. Дискомфорт от перемещения составил 0.26. Следует отметить, что в отличие от предыдущей группы пользователей, уровень дискомфорта от анимаций оказался более заметным, что указывает на значимую роль на уровне дискомфорта пользователей.

Корреляционный анализ выявил слабую и статистически незначимую связь между дискомфортом от перемещения и анимаций: $\rho = -0.003$, $p_adj = 0.99$. Это указывает на независимое восприятие данных параметров. Была выявлена умеренная связь - $\rho = 0.41$, между дискомфортом от перемещения и уровнем FPS. После коррекции множественных сравнений - $p_adj = 0.063$, можно сказать о том, что она не достигла статистической значимости, что говорит о тенденции к совместному восприятию данных параметров.

Уровень корреляции между дискомфортом от анимаций и FPS - $\rho = 0.31$, $p_adj = 0.18$, слабый и статистически незначимый. В результате это указывает на отсутствие выраженной взаимосвязи между данными параметрами в рамках исследуемой выборки.

Сравнение средних уровней дискомфорта подтвердило статистически значимые различия между всеми рассматриваемыми параметрами. Дискомфорт от анимаций оказался значительно выше, чем от перемещения

$t = -2.96$, $p_adj = 0.0068$, Wilcoxon: $p_adj = 0.0087$, с эффектом средней величины Cohen's d = -0.53 .

Значение парного t-теста = -2.96 , указывает на существенную разницу средних уровней дискомфорта. Скорректированное p-значение = 0.0068 , говорит о том, что статистически значимом результате. Дополнительно был рассчитан критерий Уилкоксона - было получено

статистически значимое значение Wilcoxon: $p_{adj} = 0.0087$. Это указывает на устойчивость выявленного эффекта.

Для оценки величины эффекта различий рассчитывался показатель Cohen's d который составил -1.04 . Полученное значение говорит о том, что разница между параметрами сильная и хорошо выраженная.

Различие между FPS и перемещением было ещё более выраженным: $t = -5.26$, $p_{adj} = 3.41 \times 10^{-5}$, Wilcoxon: $p_{adj} = 5.84 \times 10^{-5}$, с выраженным размером эффекта Cohen's $d = -0.94$. Аналогично, дискомфорт от FPS существенно превышал дискомфорт от анимаций: $t = -3.18$, $p_{adj} = 0.0068$, Wilcoxon: $p_{adj} = 0.0070$, с эффектом значительной величины Cohen's $d = -0.57$.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что для данной группы пользователей все три параметра оказывали заметное влияние на опыт и уровень дискомфорта пользователя. Наблюдается связь между методом перемещения и снижением FPS, что говорит о их связи и увиливание эффекта.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной работы был проведён анализ полученных данных в рамках эксперимента. В эксперименте использовалось программно-аппаратное обеспечение и методика, для экспериментального определения уровня VR переносимости пользователем.

Рассмотренный метод оценки дискомфорта, показал свою применимость и информативность при работе с реальными данными.

Полученные данные подтверждают, что существуют различия в уровне дискомфорта между различными выборками пользователей. Восприятие дискомфорта носит индивидуальный характер и варьируется в зависимости от пользователя или группы пользователей. Это говорит о необходимости адаптации механик действий под конкретные потребности и чувствительность аудитории, чтобы минимизировать уровень дискомфорта пользователя от взаимодействия с виртуальной реальностью.

Полученные результаты указывают на то, что пользователи способны различать отдельные составляющие дискомфорта, а метод позволяет определять структуру взаимосвязей между различными параметрами.

В проведённом исследовании, предложенный и применённый метод позволил продемонстрировать как случаи относительной независимости параметров, так и ситуации, в которых дискомфорт фактически сводился к одному параметру. Это указывает на чувствительность подхода к реальной структуре уровня дискомфорта.

Проведение парного сравнительного анализа средних уровней дискомфорта позволяет выявлять основные источники дискомфорта на уровне группы и оценивать относительную значимость параметров взаимодействия. Предложенный метод может быть использован при анализе групп пользователей с целью оценки параметров приложения и определения параметров вызываемых наибольшей дискомфорт, влияющих на пользовательский опыт и являющихся ключевым

источником дискомфорта. Определение таких параметров позволяет сформировать рекомендации по улучшению погружения в виртуальную реальность, для конкретной выборки пользователей.

При разработке программного обеспечения VR-приложений необходимо обоснованно выбирать для реализации те комбинации перемещения, которые вносят минимальный дискомфорт во время использования приложений с технологий VR.

БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] A. M. Gavvani, K. V. Nesbitt, K. L. Blackmore, and E. Nalivaiko, "Profiling subjective symptoms and autonomic changes associated with cybersickness," *Autonomic Neuroscience: Basic and Clinical*, vol. 203, pp. 41–50, 2017.
- [2] M. Usuh, E. Catena, S. Arman, and M. Slater, "Virtual locomotion: Walking in place through virtual environments," *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, vol. 33, no. 1, pp. 65–68, 1999.
- [3] K. M. Stanney, K. S. Hale, I. Nahmens, and R. S. Kennedy, "What to expect from immersive virtual environment exposure: Influences of gender, body mass index, and past experience," *Human Factors*, vol. 45, no. 3, pp. 504–520, 2003.
- [4] K. Y. Tang, G. Yu, J. Wang, Y. He, S.-Z. Xu, and S.-H. Zhang, "Strategies for reducing motion sickness in virtual reality through improved handheld controller movements," *Graphical Models*, vol. 138, 101254, 2025.
- [5] L. Rebenitsch and C. Owen, "Review on cybersickness in applications and visual displays," *Virtual Reality*, vol. 20, no. 2, pp. 101–125, 2016.
- [6] J. T. Reason, "Motion sickness: A special case of sensory rearrangement," *Advancement in Science*, vol. 26, pp. 386–393, 1970.
- [7] J. T. Reason and J. J. Brand, *Motion Sickness*. London, U.K.: Academic Press, 1975.
- [8] E. M. Kolasinski, *Simulator Sickness in Virtual Environments*, Tech. Rep. 1027, U.S. Army Research Institute for the Behavioral and Social Sciences, Alexandria, VA, 1995.
- [9] R. S. Kennedy, N. E. Lane, K. S. Berbaum, and M. G. Lilienthal, "Simulator sickness questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness," *International Journal of Aviation Psychology*, vol. 3, no. 3, pp. 203–220, 1993.
- [10] J. D. Moss, J. Austin, J. Salley, J. Coats, K. Williams, and E. R. Muth, "The effects of display delay on simulator sickness," *Displays*, vol. 32, no. 4, pp. 159–168, 2011.
- [11] J. D. Moss and E. R. Muth, "Characteristics of head-mounted displays and their effects on simulator sickness," *Human Factors*, vol. 53, no. 3, pp. 308–319, 2011.
- [12] T. Louis, J. Troccaz, A. Rochet-Capellan, and F. Bérard, "Is it real? Measuring the effect of resolution, latency, frame rate and jitter on the presence of virtual entities," in *Proc. ACM Int. Conf. Interactive Surfaces and Spaces (ISS)*, Seoul, South Korea, Nov. 2019.
- [13] The Spatial Studio, "Frame rate (XR glossary)," [Online]. Available: <https://thespatialstudio.de/en/xr-glossary/frame-rate>
- [14] Е. В. Кашкин и Д. А. Копченова, "Методическое и программно-аппаратное обеспечение выявления индивидуального киберукачивания в виртуальной реальности," *International Journal of Open Information Technologies*, т. 13, № 3, с. 65–74, 2025.
- [15] Д. А. Копченова, Е. В. Кашкин и Е. В. Никульчев, "Определение дискомфортных комбинаций перемещений в приложениях виртуальной реальности," *Электронный научный журнал «ИТ-Стандарт»*, № 4, с. 70–80, 2025.

Analysis of cybersickness during immersion and movement in virtual reality

D.A. Kopchenova

Abstract – VR is increasingly being used to solve problems in various fields, but the problem of motion sickness remains unresolved. Despite the widespread adoption of this technology and its accessibility to ordinary users, many have encountered the problem of poor tolerance (or even intolerance) to VR technology. Modern equipment has now resolved a number of technical issues. One of the main factors that triggers motion sickness is movement in virtual reality (VLT). It is necessary to customize the application for a wide range of users based on a number of technical parameters, tailored specifically to each user or group.

This paper examines basic locomotion techniques, such as smooth joystick movement and instant teleportation. Hypotheses regarding the existing relationship between the level of subjective discomfort after performing basic actions in VR and the severity of discomfort associated with a drop-in frame rate are considered. A user group's discomfort was analyzed, and the actions causing the greatest discomfort were identified. This analysis allows us to identify the most significant factors (checkpoints) of discomfort and determine the parameters that increase the level of discomfort when paired with another factor, which subsequently allows us to formulate clearer recommendations for the application being developed. A correlation analysis was also conducted between the level of discomfort associated with movement and the level of discomfort with a drop-in frame rate. The obtained data demonstrate that different user samples react to virtual reality differently.

Keywords: cybersickness, virtual reality, VR, VR portability level, Oculus Quest 2, VR movement methods, FPS, experimental hardware and software solution.

REFERENCES

- [1] A. M. Gavgani, K. V. Nesbitt, K. L. Blackmore, and E. Nalivaiko, "Profiling subjective symptoms and autonomic changes associated with cybersickness," *Autonomic Neuroscience: Basic and Clinical*, vol. 203, pp. 41–50, 2017.
- [2] M. Usoh, E. Catena, S. Arman, and M. Slater, "Virtual locomotion: Walking in place through virtual environments," *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, vol. 33, no. 1, pp. 65–68, 1999.
- [3] K. M. Stanney, K. S. Hale, I. Nahmens, and R. S. Kennedy, "What to expect from immersive virtual environment exposure: Influences of gender, body mass index, and past experience," *Human Factors*, vol. 45, no. 3, pp. 504–520, 2003.
- [4] K. Y. Tang, G. Yu, J. Wang, Y. He, S.-Z. Xu, and S.-H. Zhang, "Strategies for reducing motion sickness in virtual reality through improved handheld controller movements," *Graphical Models*, vol. 138, 101254, 2025.
- [5] L. Rebenitsch and C. Owen, "Review on cybersickness in applications and visual displays," *Virtual Reality*, vol. 20, no. 2, pp. 101–125, 2016.
- [6] J. T. Reason, "Motion sickness: A special case of sensory rearrangement," *Advancement in Science*, vol. 26, pp. 386–393, 1970.
- [7] J. T. Reason and J. J. Brand, *Motion Sickness*. London, U.K.: Academic Press, 1975.
- [8] E. M. Kolasinski, *Simulator Sickness in Virtual Environments*, Tech. Rep. 1027, U.S. Army Research Institute for the Behavioral and Social Sciences, Alexandria, VA, 1995.
- [9] R. S. Kennedy, N. E. Lane, K. S. Berbaum, and M. G. Lilienthal, "Simulator sickness questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness," *International Journal of Aviation Psychology*, vol. 3, no. 3, pp. 203–220, 1993.
- [10] J. D. Moss, J. Austin, J. Salley, J. Coats, K. Williams, and E. R. Muth, "The effects of display delay on simulator sickness," *Displays*, vol. 32, no. 4, pp. 159–168, 2011.
- [11] J. D. Moss and E. R. Muth, "Characteristics of head-mounted displays and their effects on simulator sickness," *Human Factors*, vol. 53, no. 3, pp. 308–319, 2011.
- [12] T. Louis, J. Troccaz, A. Rochet-Capellan, and F. Bérard, "Is it real? Measuring the effect of resolution, latency, frame rate and jitter on the presence of virtual entities," in *Proc. ACM Int. Conf. Interactive Surfaces and Spaces (ISS)*, Seoul, South Korea, Nov. 2019.
- [13] The Spatial Studio, "Frame rate (XR glossary)," [Online]. Available: <https://thespatialstudio.de/en/xr-glossary/frame-rate>
- [14] E. V. Kashkin and D. A. Kopchenova, "Methodical, Software and Hardware for Identifying Individual Cyber Motion Sickness in Virtual Reality," *International Journal of Open Information Technologies*, т. 13, № 3, с. 65–74, 2025.
- [15] D. A. Kopchenova, E. V. Kashkin and E. V. Nikulchev, "Identification of uncomfortable movement combinations in virtual reality applications" *Electronic scientific journal "IT-Standard"*, vol. 4, p. 70–80, 2025.

D. A. Kopchenova, graduate student, senior lecturer of KB-9 « Subject-oriented information systems» of RTU MIREA. (e-mail: kopchenova@mirea.ru).