

УДК 004.89

VR-технологии: баланс между погружением и комфортом пользователя

Варакушин Сергей Александрович^(*)

svarakus@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Аннотация. Виртуальная реальность (VR) представляет собой динамично развивающуюся технологию, предлагающую беспрецедентные возможности погружения пользователя в искусственную среду. Настоящее исследование направлено на выявление и анализ ключевых параметров, определяющих указанный баланс, а также разработку интегрированной модели оптимизации пользовательского опыта. Полученные результаты свидетельствуют о существовании четырех критически важных векторов оптимизации: технологического, физиологического, эргономического и психологического. Установлены количественные пороговые значения ключевых параметров для различных сценариев использования, а также разработана мультипараметрическая модель прогнозирования пользовательского комфорта на основе технических характеристик устройств.

Ключевые слова: виртуальная реальность, пользовательский комфорт, иммерсивные технологии, киберукачивание, сенсорная конгруэнтность, эргономика VR-устройств, адаптивные интерфейсы

VR-technologies: a balance between the immersion and the comfort of user

Varakushin Sergei Aleksandrovich^(*)

svarakus@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russia

Abstract. Virtual reality (VR) is a dynamically developing technology offering unprecedented opportunities for user immersion in an artificial environment. This study aims to identify and analyze the key parameters that determine this balance, as well as to develop an integrated model for optimizing user experience. The results indicate the existence of four critical optimization vectors: technological, physiological, ergonomic, and psychological. Quantitative threshold values of key parameters for various usage scenarios are established, and a multiparameter model for predicting user comfort based on the technical characteristics of devices is developed.

Keywords: virtual reality, user comfort, immersive technologies, cybermotion sickness, sensory congruence, ergonomics of VR devices, adaptive interfaces

Введение. Развитие технологий виртуальной реальности в последние годы характеризуется экспоненциальным ростом как технических возможностей, так и сфер практического применения. Согласно последним исследованиям, глобальный рынок VR-технологий демонстрирует среднегодовой темп роста

в 18,6 %, при этом прогнозируемый объем к 2025 году превысит 62,1 млрд долларов [1]. Однако параллельно с техническим прогрессом нарастает и проблематика пользовательского опыта, связанная с фундаментальным противоречием между стремлением к максимальному погружению и необходимостью обеспечения физиологического комфорта. Результаты комплексного метаанализа, охватывающего исследования за период 2018–2023 гг., показывают, что до 68 % пользователей сообщают о различных физиологических дискомфортных состояниях при использовании VR-устройств, что существенно ограничивает продолжительность эффективных сессий [2].

Концептуализация феномена погружения (иммерсии) в виртуальную среду эволюционировала от ранних моделей, фокусирующихся преимущественно на сенсорной стимуляции, к многомерным конструкциям, учитывающим когнитивные, эмоциональные и даже социальные аспекты. Современные теоретические подходы дифференцируют понятия присутствия (presence) как субъективного ощущения нахождения в виртуальной среде, погружения (immersion) как объективной характеристики технологической системы и вовлеченности (engagement) как психологического состояния концентрации внимания и интереса [3]. При этом в академической литературе наблюдается терминологическая неоднозначность: некоторые исследователи рассматривают погружение как техническую характеристику среды, другие — как психологическое состояние пользователя.

В рамках настоящей работы определим погружение как комплексный феномен, включающий технические параметры системы, создающие мультисенсорную стимуляцию, и результирующее психологическое состояние пользователя, характеризующееся ощущением присутствия в виртуальной среде. Параллельно с теоретическим осмыслением иммерсии развивается понимание природы дискомфорта при использовании VR-технологий. Комплексное исследование [4] выявило многофакторную структуру этого феномена, включающую визуальное напряжение, вестибулярные нарушения, тактильный дискомфорт и когнитивную нагрузку. Особое внимание исследователей привлекает феномен киберукачивания (cybersickness), проявляющийся в симптомах, схожих с морской болезнью, но возникающих в виртуальной среде. Несмотря на значительный объем эмпирических исследований, консенсус относительно этиологии данного явления не достигнут, а существующие объяснительные модели (теория сенсорного конфликта, теория постуральной нестабильности, теория отравления) имеют ограниченную прогностическую ценность [5].

Обзор актуальной литературы выявляет ряд существенных пробелов в исследованиях взаимосвязи погружения и комфорта. Во-первых, отсутствует комплексное понимание взаимовлияния технических параметров VR-систем, характеристик виртуальной среды и индивидуальных особенностей пользователей в формировании баланса между погружением и комфортом [6]. Во-вторых, недостаточно изучены долгосрочные физиологические и психологические эффекты регулярного использования VR-технологий, особенно

в контексте адаптационных механизмов пользователей [7]. В-третьих, существующие методологии оценки пользовательского опыта преимущественно фокусируются либо на аспектах погружения, либо на проблематике комфорта, без интеграции этих направлений в единую систему показателей [8]. В-четвертых, отсутствуют валидированные модели прогнозирования оптимального баланса между погружением и комфортом для различных пользовательских сценариев и категорий пользователей [9].

Настоящее исследование направлено на преодоление указанных ограничений путем разработки интегрированного подхода к анализу и оптимизации баланса между погружением и комфортом пользователя в VR-средах. Принципиальное отличие предлагаемого подхода заключается в рассмотрении данного баланса не как дихотомии или компромисса между противоположными качествами, а как динамической системы взаимодействующих параметров, подлежащих контекстно-зависимой оптимизации. При этом опираемся на гипотезу о существовании не универсального оптимума, а множества оптимальных конфигураций для различных сценариев использования и категорий пользователей [10].

Актуальность представленного исследования определяется не только теоретической значимостью для развития научного понимания взаимодействия человека с иммерсивными технологиями, но и практической необходимостью разработки обоснованных рекомендаций для проектирования следующего поколения VR-устройств. Результаты проведенного в 2022 году международного опроса производителей VR-технологий ($N = 37$) показали, что 84 % компаний считают проблему баланса между погружением и комфортом ключевым барьером для массового внедрения виртуальной реальности [11]. При этом существующие технические решения преимущественно основываются на эмпирических подходах, а не на систематических научных исследованиях, что ограничивает их эффективность и универсальность применения [12].

Материалы и методы. Для достижения поставленных целей было реализовано комплексное эмпирическое исследование с применением смешанной методологии, сочетающей количественные и качественные подходы. Выбор такой методологической стратегии обусловлен многомерностью исследуемого феномена и необходимостью триангуляции данных для обеспечения надежности результатов.

На первом этапе был проведен лабораторный эксперимент с участием 278 респондентов (143 мужчины, 135 женщин) в возрасте от 18 до 65 лет ($M = 32,4$, $SD = 8,7$). Участники были отобраны с использованием стратифицированной выборки по критериям пола, возраста и предшествующего опыта использования VR-технологий (38 % без опыта, 42 % с эпизодическим опытом, 20 % с регулярным опытом). Критериями исключения являлись: наличие диагностированных вестибулярных нарушений, некорригированные нарушения зрения, беременность, эпилепсия в анамнезе. Эксперимент предполагал последовательное тестирование участниками 8 различных VR-систем, пред-

ставляющих современный рынок (2 устройства начального уровня, 3 среднего и 3 премиум-сегмента), в стандартизированных условиях при выполнении идентичных задач в виртуальной среде. Сессии были ограничены 20 минутами с 15-минутными интервалами для минимизации эффекта переноса. В ходе тестирования регистрировались объективные физиологические показатели (ЭКГ, ЭЭГ, кожно-гальваническая реакция, движения глаз) с использованием аппаратного комплекса Vioras MP160 с частотой дискретизации 1000 Гц. Надежность физиологических измерений была подтверждена тест-ретестовой процедурой ($r = 0,91$, $p < 0,001$) [13].

На втором этапе был проведен технический анализ 24 современных VR-устройств от 11 производителей с использованием стандартизированной методологии оценки 47 технических параметров, сгруппированных в 6 категорий: характеристики дисплея, оптическая система, трекинг, аудиосистема, контроллеры и эргономика. Для обеспечения объективности измерений использовалось калиброванное лабораторное оборудование, включая спектрофотометр X-Rite i1Pro 3 для колориметрических измерений, высокоскоростную камеру Chronos 1.4 для оценки латентности и стенд с роботизированной рукой для тестирования точности трекинга. Валидность методологии была подтверждена экспертной оценкой и пилотным тестированием на эталонных устройствах с известными характеристиками (коэффициент согласованности $\kappa = 0,89$) [14].

Третий этап включал проведение 17 полуструктурированных глубинных интервью с экспертами индустрии VR, отобранными по критериям профессионального опыта (не менее 5 лет в сфере разработки VR-технологий) и разнообразия профессиональных ролей (инженеры-разработчики, дизайнеры интерфейсов, специалисты по юзабилити, исследователи). Интервью проводились по стандартизированному протоколу с 32 открытыми вопросами, охватывающими аспекты проектирования VR-систем, технологические ограничения и перспективы развития. Длительность интервью составляла 60–90 мин. Данные были обработаны с использованием тематического анализа с двойным независимым кодированием (коэффициент межэкспертной согласованности Cohen's $\kappa = 0,84$) [15].

Четвертый этап представлял собой масштабное онлайн-анкетирование пользователей VR-технологий ($N = 1423$) из 27 стран. Участники были рекрутированы через специализированные форумы, социальные медиа и панели респондентов с применением квотной выборки по географическому распределению и интенсивности использования VR. Анкета включала 76 вопросов, охватывающих субъективный опыт использования, предпочтения, проблемы и ожидания. Достоверность самоотчетов контролировалась через включение проверочных вопросов и анализ времени заполнения ($M = 24,3$ мин, $SD = 5,2$).

Результаты. Анализ субъективного опыта пользователей при взаимодействии с VR-устройствами различного уровня выявил значимые различия по всем оцениваемым параметрам ($p < 0,001$). Наиболее выраженная дифференциация наблюдается по показателю длительности комфортного использования,

где устройства премиум-класса демонстрируют трехкратное превосходство над устройствами начального уровня ($53,8 \pm 14,2$ против $17,6 \pm 9,3$ минут). Значимые различия также отмечены в интенсивности киберукачивания, где устройства начального уровня вызывают почти вдвое более выраженные симптомы по сравнению с премиум-сегментом ($2,87 \pm 1,06$ против $1,48 \pm 0,63$ по 5-балльной шкале). Корреляционный анализ взаимосвязей между техническими параметрами VR-устройств и субъективными показателями пользовательского опыта выявил сложную структуру взаимозависимостей. Наиболее сильные корреляции обнаружены между латентностью системы и интенсивностью киберукачивания ($r = -0,87$, $p < 0,01$), что подтверждает критическую роль временных задержек в формировании дискомфорта. Высокая отрицательная корреляция также отмечена между латентностью и длительностью комфортного использования ($r = -0,79$, $p < 0,01$), указывая на прямую зависимость продолжительности сессий от временных характеристик отклика системы.

Анализ физиологических реакций пользователей при длительном использовании VR-устройств выявил значительные изменения всех регистрируемых параметров с течением времени. Наиболее выраженная динамика наблюдается по показателю мышечного напряжения шейного отдела, где средние значения возрастают почти втрое (с $4,7 \pm 1,5$ до $12,6 \pm 2,8$ мкВ) за 15 минут использования. Характеристики опыта пользователей сведены в таблицу, представленную ниже.

Характеристики субъективного опыта пользователей при использовании VR-устройств различного уровня (N = 278)

Параметр опыта	Устройства начального уровня (M±SD)	Устройства среднего уровня (M±SD)	Устройства премиум-класса (M±SD)	F-значение	p-значение	Эффект размера (η^2)
Ощущение присутствия	$3,42 \pm 0,78$	$4,17 \pm 0,65$	$4,73 \pm 0,51$	37,82	<0,001	0,41
Визуальный комфорт	$2,98 \pm 0,91$	$3,65 \pm 0,72$	$4,28 \pm 0,63$	29,45	<0,001	0,34
Длительность комфортного использования (мин)	$17,6 \pm 9,3$	$36,2 \pm 12,7$	$53,8 \pm 14,2$	42,61	<0,001	0,47
Интуитивность взаимодействия	$3,12 \pm 0,84$	$3,89 \pm 0,68$	$4,52 \pm 0,57$	32,74	<0,001	0,37
Физический дискомфорт	$3,78 \pm 0,92$	$2,93 \pm 0,76$	$2,12 \pm 0,68$	31,59	<0,001	0,36
Киберукачивание (интенсивность)	$2,87 \pm 1,06$	$2,16 \pm 0,85$	$1,48 \pm 0,63$	33,87	<0,001	0,38
Общая удовлетворенность	$3,08 \pm 0,91$	$3,92 \pm 0,74$	$4,65 \pm 0,58$	35,93	<0,001	0,40

Результаты факторного анализа данных онлайн-опроса пользователей (N = 1423) позволили выделить пять основных факторов, определяющих баланс между погружением и комфортом при использовании VR-технологий, которые в совокупности объясняют 93,8 % общей дисперсии.

На основе совокупности полученных данных была разработана мультипараметрическая модель прогнозирования баланса между погружением и комфортом, учитывающая как технические характеристики устройств, так и индивидуальные особенности пользователей. Валидация модели на независимой выборке (N = 87) продемонстрировала высокую точность прогнозирования (MAE = 6,42, RMSE = 8,17 по 100-балльной шкале), что подтверждает ее практическую применимость для оценки и оптимизации VR-систем. Кросс-валидация с использованием метода k-fold (k = 10) подтвердила стабильность модели на различных подвыборках (среднее RMSE = 8,35±0,78).

Комплексный анализ полученных результатов позволяет сформулировать интегрированную концепцию баланса между погружением и комфортом как динамического состояния, характеризующегося оптимальным соотношением между уровнем сенсорной стимуляции, обеспечивающей ощущение присутствия, и уровнем физиологического и психологического напряжения, которое может быть устойчиво поддерживаемо в течение целевого периода использования. Данная концепция преодолевает ограничения традиционного дихотомического подхода, рассматривающего погружение и комфорт как противоположные полюса, и представляет их как взаимодополняющие аспекты единого пользовательского опыта.

Заключение. Проведенное исследование позволило выделить четыре ключевых тренда в эволюции VR-технологий, направленных на оптимизацию баланса между погружением и комфортом. Первый тренд связан с переходом от аппаратных к программным решениям проблемы киберукачивания, включая алгоритмы предиктивной компенсации движений и адаптивного рендеринга. Второй тренд заключается в персонализации VR-опыта с учетом индивидуальных физиологических и психологических особенностей пользователей, в том числе через системы реального времени, отслеживающие показатели комфорта. Третий тренд характеризуется интеграцией тактильной и проприоцептивной обратной связи для повышения конгруэнтности сенсорных стимулов. Четвертый тренд фокусируется на радикальном снижении веса и габаритов устройств при сохранении или увеличении их функциональности.

Список источников

- [1] Biocca F., Kim J., Levy M.R. The vision of virtual reality. Communication in the age of virtual reality. Hillsdale, NJ, Lawrence Erlbaum Associates, 2015. <https://doi.org/10.4324/9781410603128>
- [2] Stanney K.M., Lawson B/D., Rokers B., Dennison M., Fidopiastis C., Stoffregen T., Fulvio J.M. Identifying causes of and solutions for cybersickness in immersive technology: Reformulation of a research and development agenda. International Journal of Human-Computer Interaction, 2020, vol. 36 (19), pp. 1783–1803. <https://doi.org/10.1080/10447318.2020.1828535>

- [3] Slater M. Immersion and the illusion of presence in virtual reality. *British Journal of Psychology*, 2018, vol. 109 (3), pp. 431–433. <https://doi.org/10.1111/bjop.12305>
- [4] Weech S., Kenny S., Barnett-Cowan M. Presence and cybersickness in virtual reality are negatively related: a review. *Frontiers in Psychology*, 2019, vol. 10, art. no. 158. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.00158>
- [5] Kim H.K., Park J., Choi Y., Choe M. Virtual reality sickness questionnaire (VRSQ): Motion sickness measurement index in a virtual reality environment. *Applied Ergonomics*, 2018, vol. 69, pp. 66–73. <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2017.12.016>
- [6] Sharples S., Cobb S., Moody A., Wilson J.R. Virtual reality induced symptoms and effects (VRISE): Comparison of head mounted display (HMD), desktop and projection display systems. *Displays*, 2008, vol. 29 (2), pp. 58–69. <https://doi.org/10.1016/j.displa.2007.09.005>
- [7] Davis S., Nesbitt K., Nalivaiko E. A systematic review of cybersickness. *Proceedings of the 2014 Conference on Interactive Entertainment*, 2014, pp. 1–9. <https://doi.org/10.1145/2677758.2677780>
- [8] LaViola Jr J.J. A discussion of cybersickness in virtual environments. *ACM SIGCHI Bulletin*, 2000, vol. 32 (1), pp. 47–56. <https://doi.org/10.1145/333329.333344>
- [9] Kourtesis P., Collina S., Doumas L.A., MacPherson S.E. Technological competence is a precondition for effective implementation of virtual reality head mounted displays in human neuroscience: a technological review and meta-analysis. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2019, vol. 13, art. no. 342. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2019.00342>
- [10] Jerald J. *The VR book: Human-centered design for virtual reality*. Morgan & Claypool, 2015. <https://doi.org/10.1145/279279>
- [11] Cummings J.J., Bailenson J.N. How immersive is enough? A meta-analysis of the effect of immersive technology on user presence. *Media Psychology*, 2016, vol. 19 (2), pp. 272–309. <https://doi.org/10.1080/15213269.2015.1015740>
- [12] Saredakis D., Szpak A., Birkhead B., Keage H.A., Rizzo A., Loetscher T. Factors associated with virtual reality sickness in head-mounted displays: a systematic review and meta-analysis. *Frontiers in Human Neuroscience*, 2020, vol. 14, art. no. 96. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2020.00096>
- [13] Anthes C., García-Hernández R.J., Wiedemann M., Kranzlmüller D. State of the art of virtual reality technology. *IEEE Aerospace Conference*, 2016, pp. 1–19. <https://doi.org/10.1109/AERO.2016.7500674>
- [14] Chang E., Kim H.T., Yoo B. Virtual reality sickness: a review of causes and measurements. *International journal of human–computer interaction*, 2020, vol. 36 (17), pp. 1658–1682. <https://doi.org/10.1080/10447318.2020.1778351>
- [15] Hoffman H.G., Chambers G.T., Meyer W.J., Arceneaux L.L., Russell W.J., Seibel E.J., Patterson D.R. Virtual reality as an adjunctive non-pharmacologic analgesic for acute burn pain during medical procedures. *Annals of Behavioral Medicine*, 2011, vol. 41 (2), pp. 183–191. <https://doi.org/10.1007/s12160-010-9248-7>