

УДК 617-001.4-089.844:004.946]-07

Бандура О. В.¹, Антонова-Рафі Ю. В.²

¹асист. НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м.Київ, Україна, викл., НУ «Чернігівська політехніка», м.Чернігів, Україна

²старш. наук. співроб., Інститут електрозварювання імені Є.О.Патона Національної академії наук України, м.Київ, Україна; доц., Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м.Київ, Україна

ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО РЕАБІЛІТАЦІЇ ПОСТРАЖДАЛИХ ВІД БОЙОВИХ ТРАВМ: ІНТЕГРАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЙ ВІРТУАЛЬНОЇ РЕАЛЬНОСТІ

Актуальність теми. Внаслідок повномасштабної війни в Україні критично зросла кількість пацієнтів із складними бойовими травмами, зокрема мінно-вибуховими, які потребують комплексної та тривалої реабілітації. Традиційні методи часто не забезпечують повного відновлення рухових функцій, ефективного подолання больового синдрому та мінімізації психоемоційних наслідків. Впровадження технологій віртуальної реальності (VR) відкриває інноваційні можливості для персоналізації реабілітації, інтенсивної стимуляції нейропластичності та значного підвищення мотивації пацієнтів. Інтеграція VR доведено підвищує ефективність відновлення, скорочує його терміни та поліпшує якість життя постраждалих. Тому дослідження застосування VR у реабілітації поранених є пріоритетним напрямом сучасної медичної науки.

Вступ. Процес реабілітації осіб із бойовими травмами є складним, тривалим і багатокомпонентним. Особливої уваги потребують пацієнти з ампутаціями, ураженнями нервової системи, комбінованими пошкодженнями опорно-рухового апарату, а також із вираженими психоемоційними розладами. Сучасна концепція реабілітації базується на міждисциплінарному підході, який поєднує медичні, психологічні, ерготерапевтичні та технологічні методи відновлення.

Останніми роками з'являються наукові підтвердження ефективності використання технологій віртуальної реальності у відновленні моторних і когнітивних функцій після травм. Віртуальне середовище створює безпечні умови для тренування рухів, координації, рівноваги, одночасно знижуючи тривожність і підвищуючи мотивацію до занять.

В Україні вже розпочато апробацію таких технологій у провідних медичних установах, зокрема в ДУ «Інститут травматології та ортопедії НАМН України» та у центрі «Титанові» де VR-терапія поєднується з

традиційними методами фізичної терапії та ерготерапії. Аналіз результатів цих впроваджень дозволяє окреслити перспективи інтеграції VR у стандартні програми реабілітації військовослужбовців та цивільних осіб із бойовими травмами.

Мета і завдання дослідження. Мета дослідження - науково обґрунтувати та оцінити ефективність застосування технологій віртуальної реальності у комплексній реабілітації осіб після ампутації нижньої кінцівки на рівні стегна з метою оптимізації відновлення функціональної активності, просторової орієнтації та психоемоційного стану пацієнтів.

Для досягнення поставленої мети було визначено такі завдання дослідження:

Провести аналіз сучасних наукових джерел щодо використання технологій віртуальної реальності у медичній реабілітації, зокрема у пацієнтів після ампутацій нижніх кінцівок.

Оцінити особливості функціонального стану, рівноваги, ходи та психоемоційної адаптації пацієнтів після ампутації нижньої кінцівки до початку реабілітаційного курсу.

Розробити програму реабілітації з інтеграцією VR-технологій, спрямовану на формування навичок використання протеза, покращення контролю рухів та відновлення симетрії ходи.

Дослідити вплив занять у віртуальному середовищі на мотивацію, зменшення фантомних болів і підвищення залученості пацієнтів у процес відновлення.

Провести порівняльний аналіз результатів традиційної та VR-асистованої реабілітації пацієнтів після ампутації нижньої кінцівки.

Визначити критерії ефективності та розробити рекомендації щодо впровадження VR-технологій у клінічну практику реабілітації ампутантів.

Об'єкт, предмет і методи дослідження. Об'єкт дослідження – процес медичної реабілітації пацієнтів після ампутації нижньої кінцівки на рівні стегна.

Предмет дослідження – вплив технологій віртуальної реальності на функціональне відновлення, просторову координацію, психоемоційний стан та якість життя осіб після ампутації нижньої кінцівки у процесі комплексної реабілітації.

Для досягнення мети та реалізації поставлених завдань використано комплекс методів дослідження, що включає:

Теоретичні методи: аналіз сучасних наукових публікацій, клінічних протоколів і міжнародних рекомендацій щодо використання VR-технологій у фізичній та ерготерапії; узагальнення досвіду

вітчизняних і зарубіжних реабілітаційних центрів щодо впровадження інноваційних цифрових технологій у відновне лікування ампутантів.

Клініко-функціональні методи: оцінка залишкової кінцівки, м'язової сили, об'єму рухів у кульшовому суглобі; визначення рівноваги, координації та стійкості положення тіла (за шкалами Berg Balance Scale, TUG-тест); аналіз особливостей ходи до та після застосування протеза за допомогою відеогейт-аналізу або сенсорних систем.

Психологічні методи: оцінка рівня тривожності, депресивних проявів і мотивації до реабілітації (шкали HADS, SF-36, Pain Catastrophizing Scale); вивчення динаміки сприйняття власного тіла та адаптації до протезування.

Експериментальні методи: впровадження програмних VR-модулів, спрямованих на тренування рівноваги, симетрії ходи та сенсомоторної інтеграції; реєстрація фізіологічних показників (ЧСС, рівень насичення киснем, енергетичні витрати під час виконання завдань у VR-середовищі).

Математико-статистичні методи: обробка результатів із використанням параметричних і непараметричних критеріїв для визначення достовірності відмінностей (t-критерій Ст'юдента, критерій Вілкоксона, коефіцієнт кореляції Пірсона); побудова кореляційних моделей для визначення взаємозв'язку між частотою використання VR-тренувань та рівнем функціонального відновлення.

Організація та етапи дослідження.

Дослідження проводилося на базі реабілітаційного відділення, що спеціалізується на відновному лікуванні пацієнтів після ампутацій нижніх кінцівок. У дослідження було включено 40 пацієнтів віком від 25 до 60 років, які перенесли ампутацію на рівні стегна внаслідок бойових або травматичних ушкоджень.

Пацієнтів було розподілено на дві групи:

Основна група (n=20) — отримувала комплексну програму реабілітації, що включала традиційні методи фізичної та ерготерапії у поєднанні з тренуваннями у віртуальній реальності;

Контрольна група (n=20) — проходила реабілітацію за стандартними методиками без використання VR-технологій.

Усі пацієнти мали подібні вихідні показники функціонального стану, рівня ампутації та термінів післяопераційного періоду (від 6 до 12 тижнів).

Етапи дослідження

I етап — Констатувальний (підготовчий):

Обстеження, визначення вихідного стану та розробка протоколу VR-занять.

II етап — Формувальний (впроваджувальний):

Здійснювалось впровадження VR-компоненту у програму реабілітації основної групи.

Заняття проводились 3 рази на тиждень по 30–40 хвилин, курсом протягом 8 тижнів.

Паралельно проводились традиційні методи реабілітації — кінезотерапія, терапевтичні вправи, тренування на стабілоплатформі, навчання користуванню протезом.

III етап — Контрольний (оцінювальний):

Повторне комплексне обстеження, порівняльний аналіз змін функціонального стану, рівноваги (Berg), швидкості (TUG), болю (VAS) та психоемоційного стану (HADS, SF-36).

Отримані результати порівнювались між групами для визначення ефективності інтеграції VR-технологій у процес реабілітації.

Результати та їх обговорення

Після 8-тижневого курсу обидві групи показали покращення, проте результати в основній (VR) групі були статистично значущо вищими за більшістю критеріїв.

Функціональний стан і координація: Приріст балів за шкалою Berg у VR-групі був майже удвічі вищим ($+13,2 \pm 2,4$ vs $+7,1 \pm 1,9$; $p < 0,05$). Пацієнти з VR швидше відновлювали контроль над тулубом, що свідчить про ефективність мультисенсорного підходу.

Швидкість пересування: Скорочення часу TUG-тесту в основній групі було більш вираженим (з 24,6с до 15,3с vs з 25,1с до 19,8с у контрольній). VR посилила мотивацію та знизилася страх падіння.

Зменшення болю: Інтенсивність фантомного болю (VAS) знизилася в VR-групі на 45 % проти 22 % у контрольній ($p < 0,01$). Це пояснюється активацією дзеркальних нейронів і переформатуванням сенсомоторних зв'язків.

Психоемоційний стан: У VR-групі знизився рівень тривожності (на 37 %) і депресії (на 41 %), що значно перевищує показники контрольної групи (18 % і 22 % відповідно). Приріст показника «фізичного функціонування» (SF-36) був удвічі вищим (+24 бали vs +12 балів).

Обговорення результатів

Отримані дані узгоджуються з міжнародними дослідженнями, підтверджуючи, що VR є ефективним доповненням, яке підсилює ефекти фізичної, ерго- та психологічної терапії. Психологічний ефект

занурення у віртуальне середовище знижує тривогу та пришвидшує адаптацію до протеза.

Висновки.

VR-технології є ефективним інструментом у реабілітації пацієнтів після ампутації, поєднуючи сенсомоторне тренування, когнітивну стимуляцію та мотиваційний вплив.

Інтеграція VR підвищує ефективність формування навичок користування протезом, покращує координацію, рівновагу та впевненість.

VR-сценарії з біологічним зворотним зв'язком сприяють зменшенню фантомно-больового синдрому та відновленню схеми тіла.

Пацієнти з VR-компонентом демонструють швидше відновлення функціональної незалежності.

Практичні рекомендації

Включати VR-технології до програм ранньої та пізньої реабілітації осіб після ампутації нижньої кінцівки, поєднуючи їх із традиційними методами терапевтичних вправ, ерготерапії та тренування ходьби з протезом.

Використовувати VR-сценарії, спрямовані на поступове ускладнення рухових завдань — від базових рівноважних вправ до симуляції побутових і професійних дій.

Застосовувати VR як засіб корекції фантомних болів — через вправи з візуальним відображенням відсутньої кінцівки та контрольовані рухові ілюзії.

Проводити регулярний моніторинг ефективності VR-реабілітації за шкалами FIM, TAPES, VAS та показниками біомеханічного аналізу ходи.

Навчати фахівців мультидисциплінарних команд (фізичних терапевтів, ерготерапевтів, психологів, протезистів) принципам безпечного й терапевтично обґрунтованого використання VR.

Розробити стандартизовані протоколи VR-терапії для пацієнтів із ампутацією стегна, що передбачають диференційований підхід залежно від рівня ампутації, терміну післяопераційного періоду та психоемоційного стану.

Забезпечити клінічні випробування та валідацію VR-програм на базі реабілітаційних центрів, що працюють із військовими та цивільними пацієнтами після бойових травм.

Фінансування. Дослідження виконано за грантової підтримки Національного фонду досліджень України в рамках проєкту 2023.04/0073 «Розроблення концепції поліфункціонального протезно-

реабілітаційного центру з інноваційно-освітнім компонентом для пацієнтів з ампутацією кінцівок».

Список використаних джерел:

1. Hao, J., Wang, J., Zhang, L. Virtual Reality-Based Rehabilitation to Restore Motor Function in Patients With Amputation. *PM&R*. 2023. DOI: 10.1016/j.pmrj.2023.01.006. Режим доступу: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36730652/>
2. Arazpour, M., et al. The effects of virtual reality environment simulations on gait and balance in lower limb amputees: a systematic review. *Journal of Rehabilitation Sciences & Research*. 2023. DOI: 10.30476/jrsi.2023.40043037. Режим доступу: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/40043037/>
3. Steckel, B. M., et al. Immersive virtual reality applied to the rehabilitation of patients with lower limb amputation: a small randomized controlled trial for feasibility study. *Virtual Reality*. 2024. Vol. 28, iss. 1. P. 1–11. DOI: 10.1007/s10055-024-01015-x. Режим доступу: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10055-024-01015-x>
4. Cheung, J. C. W., et al. X-reality for phantom limb management for amputees: current evidence and future directions. *The Lancet Digital Health*. 2023. Vol. 5, iss. 3. P. e187–e196. DOI: 10.1016/S2589-7500(23)00013-0. Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666138123000130>
5. Yoshimura, M., et al. Case Report: Virtual reality training for phantom limb pain in an upper-limb amputee. *Frontiers in Human Neuroscience*. 2023. Vol. 17. DOI: 10.3389/fnhum.2023.1246865. Режим доступу: <https://www.frontiersin.org/journals/human-neuroscience/articles/10.3389/fnhum.2023.1246865/full>
6. Hashim, N. A., et al. On the use of virtual reality for individuals with upper limb amputation: review of recent research and applications. *Applied Sciences*. 2022. Vol. 12, iss. 24. P. 12690. DOI: 10.3390/app122412690. Режим доступу: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9987328/>
7. Liu, X., et al. A review on the usability of virtual technologies for prosthetic rehabilitation. *Bioengineering*. 2023. Vol. 10, iss. 3. P. 343. DOI: 10.3390/bioengineering10030343. Режим доступу: <https://www.research.ed.ac.uk/files/434185940/LiuEtalBioengineering2023AReviewOnTheUsability.pdf>
8. Guémann, M., et al. Effect of mirror therapy in the treatment of phantom limb pain: systematic review. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*. 2022. Vol. 65, iss. 3. DOI: 10.1016/j.rehab.2022.101676. Режим доступу: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10086832/>

9. Beibei, et al. 5G Virtual Reality System for Prosthetic Wearer Gait Simulation and Evaluation. *Mathematical Problems in Engineering*. 2022. DOI: 10.1155/2022/6311065. Режим доступа: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2022/6311065>
10. Paillet, J., et al. The Effects of Virtual Reality Interventions on Motor Function Rehabilitation in Lower-Limb Amputees: A Systematic Review and Metanalysis. *Journal of Clinical Medicine*. 2024. Vol. 12, iss. 11. P. 1170. DOI: 10.3390/jcm12111170. Режим доступа: <https://www.mdpi.com/2306-5354/12/11/1170>