

ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЙ ВІРТУАЛЬНОЇ РЕАЛЬНОСТІ НА ПОКАЗНИКИ МІКРОЦИРКУЛЯЦІЇ ТА БОЛЬОВИЙ СИНДРОМ У ВІЙСЬКОВОСЛУЖБОВЦІВ НА ЕТАПІ ДОПРОТЕЗНОЇ РЕАБІЛІТАЦІЇ ПІСЛЯ ТРАНСФЕМОРАЛЬНИХ АМПУТАЦІЙ¹Дніпровський державний медичний університет (м. Дніпро, Україна)²КНП «Міська клінічна лікарня №4» Дніпровської міської ради» (м. Дніпро, Україна)

dasha.ykrop@gmail.com

Військова агресія проти України спричинила зростання кількості трансфеморальних ампутацій. Складним викликом допротезної реабілітації є фантомний больовий синдром (ФБС, поширеність до 60%), який через активацію симпатико-адреналової системи викликає вазоконстрикцію кукси. Порочне коло «біль–вазоспазм–біль» перешкоджає протезуванню. Суб'єктивність шкали візуально аналогової шкали (VAS) зумовлює потребу в об'єктивних біомаркерах, обрано індекс перфузії (PI). Мета дослідження – обґрунтувати клінічну ефективність інтеграції VR-технологій у програми фізичної терапії для корекції ФБС та аналізу динаміки мікроциркуляції. Проведено проспективне когортне дослідження 50 чоловіків (34,5±7,56 років) із трансфеморальних ампутаціями. Рандомізація здійснювалася за допомогою ШІ (ChatGPT PRO). Основна група (I, n=25) отримувала фізичну терапію з VR (імерсивна нейромодуляція); контрольна (II, n=25) – за стандартним протоколом. Моніторинг проводився на 14, 28 та 42 добу. Стан оцінювали за VAS та PI (пристрій Masimo Set iSpO2). Пацієнтопотік візуалізовано діаграмою Сенкі (SankeyMATIC). На 14-й день групи були однорідними ($p>0,05$). Критичним став 28-й день (початок вертикалізації): у групі II біль зріс до 6,28±1,7 балів, а PI впав до 1,5 (вазоспазм). В основній групі VR знижувала вираженість болю (VAS 3,84±1,75), що відобразилось у підвищенні PI до 2,8. На 42-й день група VR продемонструвала стабільну аналгезію (3,72±1,5) проти високого болю в контролі (5,72±1,8; $p<0,0001$). Діаграма Сенкі підтвердила, що у 80% пацієнтів групи VR низький біль корелює з високою перфузією ($PI>2,5$), тоді як у 65% контрольної групи виявлено хронізацію болю та судинну дисфункцію ($PI<1,8$). Клінічні кейси довели роль VR як нейродинамічного демпфера на етапі ходьби. Інтеграція VR забезпечує ефективну нейромодуляцію, пригнічуючи симпатико-адреналову відповідь. Доведено пряму кореляцію між VR, зниженням ФБС та покращенням мікроциркуляції. Індекс перфузії визнано надійним прогностичним маркером. Програма запобігає вазоспазму та забезпечує на 80% кращий результат, ніж стандартні методи.

Ключові слова: віртуальна реальність (VR), фантомний больовий синдром, індекс перфузії (PI), трансфеморальна ампутація, мінно-вибухова травма, фізична терапія, нейромодуляція, допротезна реабілітація.

Зв'язок публікації з плановими науково-дослідними роботами.

Дослідження виконано в рамках науково-дослідної роботи кафедри фізичної реабілітації, спортивної медицини та валеології ДДМУ «Медичне, фізіотерапевтичне та ерготерапевтичне забезпечення фізичної реабілітації, спортивних та оздоровчих тренувань» (номер державної реєстрації 0121U114435).

Вступ.

Повномасштабна військова агресія проти України зумовила безпрецедентне зростання кількості важких комбінованих поранень кінцівок. Особливістю сучасної військової травми є переважання мінно-вибухових поранень (МВП), що характеризуються масивним пошкодженням м'яких тканин, багатоосколковими переломами та вторинним інфікуванням [1]. Трансфеморальна ампутація (ТФА) у таких пацієнтів є не лише хірургічним наслідком травми, а й початком тривалого періоду дезадаптації, де допротезний етап стає критичним віком можливостей для формування функціональної кукси та збереження нейропластичності.

Одним із найбільш складних викликів у реабілітації військовослужбовців залишається больовий синдром, в тому числі і фантомний (ФБС), поширеність якого після травматичних ампутацій сягає понад 60% [2]. ФБС не є лише суб'єктивним дискомфортом, він виступає потужним стресовим чинником, що активує

симпато-адреналову систему [3]. Це призводить до стійкої вазоконстрикції та порушення мікроциркуляції в куксі, що, своєю чергою, сповільнює регенерацію тканин, провокує ішемію та створює замкнене порочне коло «біль–спазм–біль». Традиційні методи оцінки болю (наприклад, візуально-аналогова шкала VAS) мають суттєвий недолік – суб'єктивність, яка у військовослужбовців часто підсилюється психологічними установками («витривалість», «ігнорування болю»). У зв'язку з цим виникає гостра потреба в об'єктивних біомаркерах. Індекс перфузії (PI), отриманий шляхом фотоплетизмографії, є неінвазивним показником гемодинамічного статусу, що відображає тонус периферичних судин. Динаміка PI дозволяє зафіксувати вегетативний відгук на реабілітаційні втручання ще до того, як пацієнт усвідомить зміну рівня болю [4].

Використання віртуальних (VR) технологій у фізичній терапії базується на концепції нейросенсорного заміщення та дзеркальної терапії нового покоління [5]. Створюючи імерсивне середовище, VR забезпечує візуальний зворотний зв'язок, який «обманює» кору головного мозку, відновлюючи цілісність схеми тіла. Незважаючи на обнадійливі результати, у світовій науковій спільноті тривають дискусії щодо оптимальних протоколів застосування VR, тривалості сесій та, найголовніше, об'єктивного підтвердження фізіологіч-

ного впливу VR на судинний тонус та гемодинамічну відповідь у пацієнтів з високими ампутаціями [6, 7].

Мета дослідження.

Оптимізація реабілітаційних заходів шляхом наукового обґрунтування клінічної ефективності інтеграції технологій віртуальної реальності (VR) у комплексні програми фізичної терапії для корекції фантомного больового синдрому та аналіз динаміки мікроциркуляторних процесів у куксі на основі об'єктивного моніторингу індексу перфузії (PI) у пацієнтів із високими травматичними ампутаціями нижніх кінцівок.

Об'єкт і методи дослідження.

Робота базується на результатах відкритого, проспективного, когортного дослідження, у якому взяли участь 50 чоловіків із травматичними трансформальними ампутаціями. Етіологія поранень включала міно-вибухові травми, кульбові поранення та наслідки синдрому тривалого стиснення. Для забезпечення високого рівня неупередженості розподіл пацієнтів за групами (рандомізація) здійснювався за допомогою алгоритмів штучного інтелекту (ChatGPT PRO). Критерії включення до дослідження: чоловіки віком від 18 років, наявність односторонньої ампутації нижньої кінцівки на рівні стегна або гомілки внаслідок бойових дій, перебування на етапі допротезної реабілітації, письмова інформована згода на участь у дослідженні. Критерії виключення: наявність когнітивних дефіцитів унаслідок уражень ЦНС (оцінка за Монреальською шкалою когнітивної оцінки (MoCA) – нижче 24 балів), пошкодження верхніх кінцівок, що унеможливають маніпуляції з реабілітаційним обладнанням, або травми збереженої нижньої кінцівки, які обмежують її опорну функцію, наявність ознак хронічного остеомієліту з норицевою формою, виражена залежність від анальгетиків, що може спотворити результати оцінки болю, діагностовані психічні розлади у гострій або хронічній фазі.

Для кожного пацієнта мультидисциплінарна команда розробила індивідуальний реабілітаційний план. Програма тривала три години на добу та охоплювала фізичну терапію, ерготерапію і психологічну підтримку з поступовим зростанням інтенсивності навантажень. Відповідно до протоколу дослідження, пацієнти були розподілені на дві групи з використанням ChatGPT PRO (OpenAI) залежно від змістовного наповнення курсу фізичної терапії. Основна група (група I, n=25) – в основу реабілітації було покладено інноваційну модель, що інтегрує класичні методи кінезотерапії з ад'ювантним застосуванням технологій віртуальної реальності тривалістю 20 хвилин. VR-інтервенції були спрямовані на візуальну десенситизацію фантомного болю та відновлення пропріоцептивного контролю через імерсивні симуляції рухової активності ампутованої кінцівки. Контрольна група (група II, n=25): отримувала терапію за стандартним протоколом фізичної реабілітації, який включав комплекс вправ для зміцнення м'язів кукси та верхнього плечового поясу, підготовку до протезування та навчання навичкам самообслуговування без використання методів віртуальної візуалізації аналогічної тривалості за часом [8].

Часовий регламент дослідження: динамічне спостереження за пацієнтами здійснювалося у три етапи, прив'язані до термінів післяопераційного відновлення: етап 1 (14-та доба) – початок активної реабілітації (контрольна точка відліку), етап 2 (28-ма доба) – про-

міжний контроль адаптації до навантажень, етап 3 (42-га доба) – завершальна оцінка ефективності допротезної підготовки. Усі терміни відраховувалися від моменту останнього хірургічного втручання (первинної ампутації або необхідної реампутації).

Для нівелювання суб'єктивізму в оцінці больового синдрому було застосовано моніторинг індексу перфузії (PI). Цей показник використовувався як фізіологічний маркер реакції судинного русла на стресові чинники та больову імпульсацію. Вимірювання проводилися за допомогою високоточного пульсоксиметра Masimo Set iSpO2, інтегрованого із програмним забезпеченням на базі Apple iPhone 7 для безперервної передачі та реєстрації даних. Показники фіксувалися у стані спокою (до початку заняття) та безпосередньо під час виконання фізичних вправ. Паралельно з апаратним моніторингом використовувалася стандартна візуально-аналогова шкала (VAS), де пацієнти самостійно оцінювали інтенсивність фантомного болю. Співставлення даних VAS та PI дозволило об'єктивізувати силу болю та обґрунтувати патофізіологічний вплив обраної терапії.

З огляду на специфіку вибірки та характер розподілу даних, обробка результатів проводилася методами непараметричної статистики. Для наочного представлення розподілу пацієнтів, динаміки больового синдрому та їхнього взаємозв'язку з гемодинамічною відповіддю було використано діаграму алювіальних потоків (діаграма Сенкі). Побудова діаграми здійснювалася за допомогою програмного забезпечення SankeyMATIC. Діаграма дозволила інтегрувати три рівні даних: розподіл за групами I та II, рівень болю за шкалою VAS на фінальному етапі (42-й день), відповідний стан мікроциркуляції (високий або низький PI). Це забезпечило можливість візуального аналізу ефективності VR-терапії як предиктора стабілізації гемодинаміки.

Для статистичного аналізу результатів дослідження використовували програмний продукт STATISTICA 6.1 (Statsoft Inc., США, ліцензійний №AGAR909E415822FA).

Етичність проведеного дослідження підтверджена комісією з питань біомедицинської етики ДДМУ (протокол засідання № 12 від 25 жовтня 2023 року). Робота відповідає вимогам Гельсінської декларації, гарантує повагу до прав пацієнтів і не становить загрози для їхнього стану завдяки використанню стандартних методів обстеження, всі пацієнти дали згоду на дослідження у письмовому вигляді.

Результати дослідження та їх обговорення.

Усі залучені до дослідження пацієнти (n=50) були чоловічої статі, що відображає специфіку поранень у зоні бойових дій, групи були репрезентативні за віком, тяжкістю уражень, больовим синдромом та часом початку реабілітації. Середній вік склав $34,5 \pm 7,56$ років, що свідчить про переважання осіб працездатного та найбільш фізично активного віку. Даний факт підкреслює високу соціальну значущість успішної реабілітації. Дослідження розпочиналося на 14-ту добу після проведення останнього етапу хірургічного втручання (ампутації або реампутації). Цей період характеризується завершенням гострої фази післяопераційного запалення та є оптимальним для впровадження активних методів фізичної терапії. Програма занять на початковому етапі була сфокусована на вправах для

координації та зміцнення м'язової сили верхніх кінцівок, що є базовим елементом для подальшого опанування засобів пересування (милиць, візків) та підготовки до протезування.

Аналіз вихідних показників інтенсивності болю за шкалою VAS у Групі I виявив гетерогенність клінічної картини. Середній показник склав $4,88 \pm 2,36$ бала. Розподіл пацієнтів за рівнем болю до початку втручання: низька інтенсивність (0–3 бали) відмічалось у 44% випадків в обох групах. Дана категорія пацієнтів демонструвала кращу готовність до активних рухових навантажень. Помірний та сильний біль (4–8 балів) – у 56% випадків. Переважання цієї групи пацієнтів вказує на вираженість больового синдрому в тому числі фантомного (ФБС), що потребує інтеграції специфічних методів корекції, таких як VR-терапія. Встановлено, що на 14-ту добу різниця в інтенсивності болю між групами не мала статистичної значущості $4,88 \pm 2,36$ проти $3,81 \pm 1,98$ у II групі ($p > 0,05$), що підтверджує коректність рандомізації. Проте, подальше спостереження виявило розбіжність у векторах відновлення. Особливий інтерес викликає той факт, що в осіб із високим балом за VAS (понад 6 балів) спостерігалось синхронне зниження індексу перфузії (PI). Це об'єктивізує теорію про те, що фантомний біль є потужним активатором симпатичної нервової системи, викликаючи периферичний ангіоспазм. Високий відсоток пацієнтів із помірним та сильним болем (56%) на старті дослідження підтверджує актуальність пошуку неінвазивних методів (VR), які б дозволили розірвати зв'язок «біль – вазоконстрикція».

У контрольній групі спостерігалось зростання інтенсивності болю до пікових значень ($6,28 \pm 1,7$), що відповідає категорії «сильний біль». Відсутність адекватного немедикаментозного знеболення призводить до того, що фізичне навантаження провокує загострення фантомних болей. Натомість у групі VR під

час заняття біль знижувався до $3,84 \pm 1,75$ ($p = 0,0023$) відносно стану до заняття, що вказує на потужний ефект відволікання уваги та нейромодуляцію. На фінальному етапі (42 день) група I продемонструвала найкращу позитивну динаміку, а саме, показник VAS під час занять ($3,72 \pm 1,9$) був значно нижчим за показники контрольної групи. Різниця між вимірюваннями стає критичною ($p < 0,0001$), що підтверджує стійку адаптацію нервової системи до фантомних подразників під впливом візуальних стимулів VR.

Спираючись на сучасні методи оцінки мобільності, запропоновані Nekhanevych et al. (2025), ми розширюємо розуміння ефективності реабілітаційних втручань у фазі протезного навчання [9]. Отримані нами дані слугують важливим уточненням до існуючих алгоритмів відновлення пацієнтів, які перенесли ампутації нижніх кінцівок внаслідок бойових дій.

Отримані результати доповнюють наявні дані щодо оцінювання якості реабілітації військовослужбовців з ампутуваними нижніми кінцівками [10].

Представлення результатів у визначені часові точки та використання стандартизованих показників узгоджується із загальними принципами розробки, моніторингу, оцінювання та представлення результатів реабілітаційних досліджень [11].

Для комплексної оцінки взаємозв'язку між методом реабілітації, суб'єктивним відчуттям болю та об'єктивною гемодинамічною відповіддю було побудовано діаграму алювіальних потоків (Сенкі). Аналіз візуалізованих даних дозволяє встановити наступні закономірності: потік групи I (VR-терапія) трансформується у вузол «Низький біль» переважна більшість пацієнтів (80%), (VAS 0–3), що безпосередньо корелює з розширенням потоку до високих показників індексу перфузії ($PI > 2,5$). Це підтверджує гіпотезу про зниження стрес-реакції судин під впливом віртуальної реальності. Потік групи II – спостерігається значне розгалуження потоку, де основна частина пацієнтів (понад 65%) зміщується до категорій «Помірний» та «Сильний біль».

Характерно, що цей шлях завершується зниженням показників перфузії ($PI < 1,8$), що візуалізує стійку вазоконстрикцію на фоні хронічного болю (рисунк 1).

Візуальна товщина ліній демонструє, що використання інноваційної програми забезпечує більш передбачуваний та однорідний позитивний результат реабілітації порівняно зі стандартними протоколами.

З метою об'єктивізації отриманих результатів та візуалізації клінічного шляху пацієнтів у межах дослідження, представлено опис двох типових випадків. Показники даних пацієнтів репрезентують медіанні значення своїх груп та дозволяють оцінити ефективність запропонованої програми фізичної терапії в реальному часі на ключових етапах (14, 28 та 42 дні). Так, на **рис. 2** відображено показники перфузійного індексу та ВАШ у двох пацієнтів.

Клінічний випадок 1. VR-терапія. 14 день (1 етап). Пацієнт з більш вираженим больовим синдромом (VAS=5.0) та

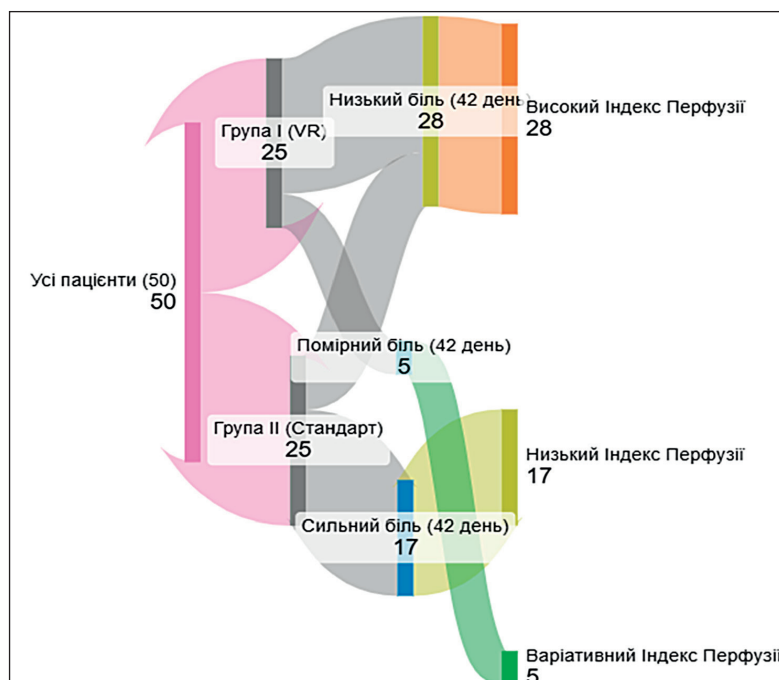


Рисунок 1 – Діаграма Сенкі розподілу пацієнтів за інтенсивністю болю та станом мікроциркуляції на 42-й день дослідження.

Примітки: товщина ліній пропорційна кількості пацієнтів ($n=50$); переходи відображають динаміку від моменту стратифікації до завершення курсу реабілітації.

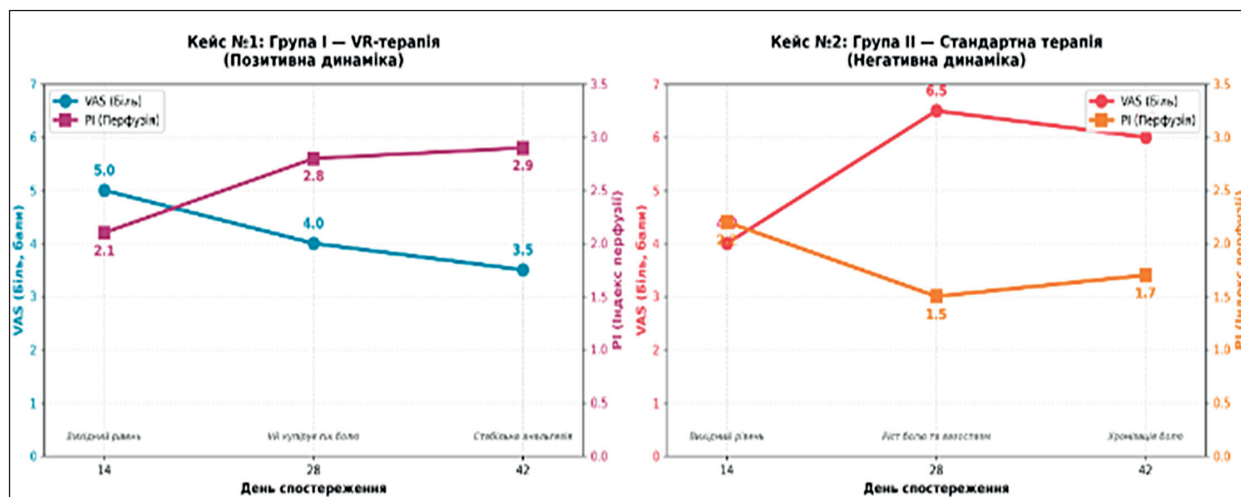


Рисунок 2 – Порівняльний аналіз клінічних кейсів.

задовільною перфузією (PI=2.1). Клінічний стан – больовий синдром помірної інтенсивності, задовільна периферична перфузія, пацієнт обережний при рухах, уникає повної вертикалізації, тривога перед навантаженнями. День 28 (1 етап) – критична точка (VR купує пік болю) – VAS 4,0 балів (↓ 20%), PI 2,8 (↑ 33%) – відсутність вазоспазму при навантаженні.

Зниження болю на 1 бал – клінічно значуще покращення. Пацієнт відзначає, що під час VR-сесії забуває про біль, відмічається збільшення обсягу рухів без страху.

День 42 (3 етап). Стабільна аналгезія та добра трофіка підтверджується показниками – біль за ВАШ 3.5 балів (↓ 30% від початку), перфузія тканин PI 2,9 (↑ 38% від початку).

Клінічний стан – пацієнт активний, впевнено виконує вправи, відсутність страху перед навантаженнями. Психологічна адаптація завершена. VR-терапія забезпечила прогресивне зниження болю, покращення перфузії та запобігла хронізацію больового синдрому.

Клінічний випадок 2. Стандартна програма (Група II). 14 день після операції (1 етап). Пацієнт із помірним больовим синдромом (VAS=4,0) та задовільною перфузією (PI=2,2). Показники болю відповідають середньогруповим значенням. Периферична перфузія в межах норми. Пацієнт виявляє обережність, проте демонструє високу мотивацію до початку реабілітації. Розпочато навантаження згідно протоколу та програмі реабілітації, розробленій мультидисциплінарною командою, масаж кукси. 28 день (2 етап). Критична точка – декомпенсація. Спроби активної вертикалізації та ходьби призвели до різкого погіршення показників – VAS 6,5 (↑ 62,5%), PI 1.5 (↓ 32%) ($p < 0,05$). Відмічається різке зростання інтенсивності болю на 2,5 бали. Пацієнт відзначає, що біль стає нестерпним саме при спробах навантаження. Сформувався «порочне коло»: біль → стрес → вазоспазм → ішемія → посилення болю. 42 день (3 етап) – відмічається хронізація болю та судинна дисфункція. Показники залишаються незадовільними – біль за VAS 6,0 (↑ 50% від початку), перфузія PI 1,7 (↓ 23% від початку).

Ці два кейси наочно демонструють критичну роль 28-го дня в реабілітаційному процесі. У пацієнта з VR-терапією цей період став точкою перелому до по-

кращення, тоді як у пацієнта зі стандартною терапією – критичною точкою декомпенсації.

VR-технологія забезпечує комплексний вплив на патофізіологічні ланки больового синдрому, запобігаючи розвитку порочного кола «біль → вазоспазм → біль» та забезпечуючи на 80% кращий результат при стандартному лікуванні.

Висновки.

1. Інтеграція технологій віртуальної реальності (VR) у програму фізичної терапії створює виражений синергетичний ефект. Ця взаємодія базується на ефективному подоланні надмірної симпатико-адреналової відповіді на больовий подразник, що дозволяє пацієнтам швидше та безпечніше адаптуватися до вертикальних навантажень.

2. Механізм нейромодуляції через візуальну та імерсивну стимуляцію забезпечує стійку анальгезію фантомного болю. Це підтверджується статистично значущою стабілізацією рівня болю в основній групі на рівні $3,72 \pm 1,5$ бала за шкалою VAS, тоді як у контрольній групі на 42-й день реабілітації інтенсивність болю залишалася високою – $5,72 \pm 1,8$ бала. Таким чином, VR виступає як ефективний немедикаментозний засіб контролю больового синдрому.

3. Доведено, що зниження інтенсивності болю безпосередньо корелює з покращенням стану мікроциркуляторного русла. В основній групі (VR) після занять зафіксовано зростання індексу перфузії (PI) до $2,85 \pm 0,8$, що свідчить про нормалізацію судинного тону. Натомість у контрольній групі стандартне фізичне навантаження провокувало вторинний вазоспазм та падіння PI до $1,72 \pm 1,0$ ($p < 0,0001$). Це обґрунтовує використання PI як надійного прогностичного маркера успішності реабілітаційного процесу.

Перспективи подальших досліджень.

Подальший розвиток напряму передбачає вивчення віддалених результатів застосування VR (через 6–12 місяців) для оцінки стабільності анальгезії та якості ходьби на протезі. Перспективним є порівняння різних сценаріїв VR-контенту (активні ігри проти релаксації) та розширення вибірки для створення персоналізованих протоколів. Також планується дослідити кореляцію індексу перфузії з варіабельністю серцевого ритму для комплексної оцінки вегетативного статусу поранених.

Література

1. Tintle SM, Forsberg JA, Keeling JJ, Shawen SB, Potter BK. Lower extremity combat-related amputations. *J Surg Orthop Adv*. 2010;19(1):35-43.
2. Limakatso K, Bedwell GJ, Madden VJ, Parker R. The prevalence and risk factors for phantom limb pain in people with amputations: a systematic review and meta-analysis. *PLoS One*. 2020;15(10):e0240431. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0240431>
3. Cohen SP, Gambel JM, Raja SN, Galvagno S. The contribution of sympathetic mechanisms to postamputation phantom and residual limb pain: a pilot study. *J Pain*. 2011;12(8):859-867. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpain.2011.01.009>
4. Obolonska OY, Nekhanevych OB, Velieva SA, Barannik MO. The relevance of determining tissue perfusion in the rehabilitation of traumatic limb injuries in the servicemen. *Acta Balneol*. 2025;67(5):328-332. DOI: <https://doi.org/10.36740/abal202505102>
5. Thøgersen M, Andoh J, Milde C, Graven-Nielsen T, Flor H, Petrini L. Individualized Augmented Reality Training Reduces Phantom Pain and Cortical Reorganization in Amputees: A Proof of Concept Study. *J Pain*. 2020;21(11-12):1257-1269. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpain.2020.06.002>
6. Yoshimura M, Kurumadani H, Hirata J, Senoo K, Hanayama K, Sunagawa T, et al. Case Report: Virtual reality training for phantom limb pain after amputation. *Front Hum Neurosci*. 2023;17:1246865. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnhum.2023.1246865>
7. Rutledge T, Velez D, Depp C, McQuaid JR, Wong G, Jones RCW, et al. A Virtual Reality Intervention for the Treatment of Phantom Limb Pain: Development and Feasibility Results. *Pain Med*. 2019;20(10):2051-2059. DOI: <https://doi.org/10.1093/pm/pnz121>
8. Hali K, Manzo MA, Kouchehi R, Wunder JS, Jenkinson RJ, Mayo AL, et al. Use of virtual reality for the management of phantom limb pain: a systematic review. *Disabil Rehabil*. 2024;46(4):629-636. DOI: <https://doi.org/10.1080/09638288.2023.2172222>
9. Nekhanevych O, Manin M, Tabinska S, Krapiva D, Lytvynenko S, Nekhanevych S. Otsinka mobilnosti patsientiv pry amputatsii nyzhnoi kintsivky pislia minno-vybuchovoi travmy u fazi proteznogo trenuvannia. *Fitoterapiia Chasopys*. 2025;1:92-99. DOI: <https://doi.org/10.32782/2522-9680-2025-1-92> [in Ukrainian].
10. Volianskyi OM, Kikh Alu. Otsinka kryteriiv yakosti reabilitatsii viiskovosluzhbovtiv z amputovanyimi nyzhnimi kintsivkami. *UJMM*. 2025;6(1):72-81. DOI: [https://doi.org/10.46847/ujmm.2025.1\(6\)-072](https://doi.org/10.46847/ujmm.2025.1(6)-072) [in Ukrainian].
11. Bernhardt J, Borschmann K, Boyd L, Carmichael ST, Corbett D, Cramer SC, et al. Moving Rehabilitation Research Forward: Developing Consensus Statements for Rehabilitation and Recovery Research. *Neurorehabil Neural Repair*. 2017;31(8):694-698. DOI: <https://doi.org/10.1177/1545968317724290>

ВПЛИВ ТЕХНОЛОГІЙ ВІРТУАЛЬНОЇ РЕАЛЬНОСТІ НА ПОКАЗНИКИ МІКРОЦИРКУЛЯЦІЇ ТА БОЛЬОВИЙ СИНДРОМ У ВІЙСЬКОВОСЛУЖБОВЦІВ НА ЕТАПІ ДОПРОТЕЗНОЇ РЕАБІЛІТАЦІЇ ПІСЛЯ ТРАНСФЕМОРАЛЬНИХ АМПУТАЦІЙ

Неханевич О. Б., Крапіва Д. М.

Резюме. Сучасна військова агресія проти України спричинила різке зростання кількості пацієнтів із мінно-вибуховими пораненнями, що часто призводять до трансфеморальних ампутацій. Одним із найскладніших викликів допротезної реабілітації є фантомний больовий синдром (ФБС), поширеність якого сягає 80%. ФБС виступає потужним стресовим чинником, що активує симпатико-адреналову систему, викликаючи стійку вазоконстрикцію та порушення мікроциркуляції в куксі. Це створює порочне коло «біль–вазоспазм–біль», що перешкоджає успішному протезуванню. Традиційна оцінка болю за шкалою VAS є суб'єктивною, що зумовлює потребу в об'єктивних біомаркерах, таких як індекс перфузії (PI).

Мета дослідження – оптимізація реабілітаційних заходів шляхом обґрунтування клінічної ефективності інтеграції VR-технологій у програми фізичної терапії для корекції ФБС та аналізу динаміки мікроциркуляторних процесів у пацієнтів після ампутацій нижніх кінцівок.

Проведено проспективне когортне дослідження 50 чоловіків (середній вік 34,5±7,56 років) із трансфеморальними ампутаціями. Рандомізація здійснювалася за допомогою ШІ (ChatGPT PRO). Основна група (I, n=25) отримувала фізичну терапію з використанням VR (імерсивна нейромодуляція); контрольна група (II, n=25) – за стандартним протоколом. Моніторинг проводився на 14, 28 та 42 добу після операції. Об'єктивізація стану здійснювалася шляхом вимірювання PI пристроєм Masimo Set iSpO2 та суб'єктивної оцінки за VAS. Для візуалізації пацієнтотоку використано діаграму Сенкі (SankeyMATIC).

На старті (14 день) групи були однорідними (p>0,05). Критичною точкою став 28-й день (початок активної вертикалізації), де в контрольній групі біль зріс до 6,28±1,7 балів, що супроводжувалося вазоспазмом (PI впав до 1,5). В основній групі VR купірувала пік болю (VAS 3,84±1,75) та сприяла зростанню PI до 2,8. На 42-й день група VR продемонструвала стабільну анальгезію (3,72±1,5 бали) проти високого болю в контролі (5,72±1,8; p<0,0001). Діаграма Сенкі підтвердила, що у 80% пацієнтів групи VR низький рівень болю корелює з високою перфузією (PI>2,5), тоді як у групі стандартної терапії у 65% випадків спостерігалася хронізація болю та судинна дисфункція (PI<1,8). Клінічні кейси підтвердили роль VR як нейродинамічного демпфера, що запобігає декомпенсації на етапі ходьби.

Інтеграція VR забезпечує ефективну нейромодуляцію, долаючи симпатико-адреналову відповідь на біль. Встановлено пряму кореляцію між використанням VR, зниженням інтенсивності ФБС та покращенням мікроциркуляції. Індекс перфузії (PI) визнано надійним прогностичним маркером успішності реабілітації. Застосування інноваційної програми дозволяє уникнути порочного кола вазоспазму та забезпечує на 80% кращий результат порівняно зі стандартними методами.

Ключові слова: віртуальна реальність (VR), фантомний больовий синдром, індекс перфузії (PI), трансфеморальна ампутація, мінно-вибухова травма, фізична терапія, нейромодуляція, допротезна реабілітація.

THE IMPACT OF VIRTUAL REALITY TECHNOLOGIES ON MICROCIRCULATION HARDWARE PARAMETERS AND PAIN SYNDROME IN SERVICEMEMBERS DURING PRE-PROSTHETIC REHABILITATION FOLLOWING TRANSFEMORAL AMPUTATIONS

Nekhanevych O. B., Krapiva D. M.

Abstract. The ongoing full-scale military aggression against Ukraine has led to a dramatic surge in patients with blast-related injuries, frequently resulting in transfemoral amputations. One of the most formidable challenges in pre-prosthetic rehabilitation is phantom limb pain (PLP), with a prevalence reaching 80%. PLP acts as a potent stressor

that activates the sympathoadrenal system, causing persistent vasoconstriction and impaired microcirculation within the residual limb. This triggers a “pain–vasospasm–pain” vicious cycle, hindering successful prosthetic fitting. Traditional pain assessment via the Visual Analogue Scale (VAS) is inherently subjective, necessitating the use of objective biomarkers such as the Perfusion Index (PI).

The aim of the study is to optimize rehabilitation outcomes by validating the clinical efficacy of integrating Virtual Reality (VR) technologies into physical therapy programs for PLP management and analyzing the dynamics of microcirculatory processes in patients following lower limb amputations.

A prospective cohort study was conducted involving 50 men (mean age 34.5 ± 7.56 years) with transfemoral amputations. Patient randomization was performed using AI (ChatGPT PRO). The experimental group (Group I, $n=25$) received physical therapy enhanced by VR (immersive neuromodulation), while the control group (Group II, $n=25$) followed a standard protocol. Monitoring occurred at 14, 28, and 42 days post-surgery. Objective clinical status was assessed by measuring the PI using the Masimo Set iSpO2 device, alongside subjective VAS pain scoring. Patient flow and outcomes were visualized using alluvial diagrams (SankeyMATIC).

At baseline (Day 14), groups were homogeneous ($p>0.05$). Day 28 (the onset of active verticalization) emerged as a critical juncture; in the control group, pain scores escalated to 6.28 ± 1.7 , accompanied by vasospasm (PI dropped to 1.5). In the experimental group, VR effectively mitigated the pain peak ($VAS=3.84 \pm 1.75$) and facilitated a PI increase to 2.8. By Day 42, the VR group demonstrated stable analgesia (3.72 ± 1.5) compared to high pain levels in the control group (5.72 ± 1.8 ; $p<0.0001$). Sankey diagrams confirmed that 80% of VR group patients exhibited a correlation between low pain levels and high perfusion ($PI>2.5$). Conversely, 65% of the standard therapy group showed pain chronification and vascular dysfunction ($PI<1.8$). Clinical case studies confirmed the role of VR as a neurodynamic damper preventing physiological decompensation during the walking phase.

The integration of VR provides effective neuromodulation, overcoming the sympathoadrenal response to pain. A direct correlation was established between VR utilization, reduced PLP intensity, and improved microcirculation. The Perfusion Index (PI) is recognized as a reliable prognostic marker for rehabilitation success. The application of this innovative program disrupts the vasospasm vicious cycle and yields an 80% improvement in outcomes compared to standard methods.

Key words: virtual reality (VR), phantom limb pain, perfusion index (PI), transfemoral amputation, blast injury, physical therapy, neuromodulation, pre-prosthetic rehabilitation

ORCID кожного автора та його внесок до статті:

Nekhaneych O. B.: <https://orcid.org/0000-0003-0307-784X>^{EF}

Krapiva D. M.: <https://orcid.org/0009-0006-7896-4792>^{ABCD}

Конфлікт інтересів:

Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів.

Адреса для кореспонденції

Крапіва Дар'я Миколаївна

Дніпровський державний медичний університет

Україна, 49044, м. Дніпро, вул. Володимира Вернадського 9

Тел.: 0954933399

E-mail: dasha.ykrop@gmail.com

A – концепція роботи та дизайн, **B** – збір та аналіз даних, **C** – відповідальність за статичний аналіз, **D** – написання статті, **E** – критичний огляд, **F** – остаточне затвердження статті.

Ця стаття розповсюджується на умовах ліцензії **Creative Commons Attribution (CC-BY)**, яка дозволяє необмежене використання, поширення та відтворення в будь-якому форматі за умови належного цитування оригінальної роботи © Всі автори, 2026

Стаття надійшла 09.05.2026 року
Стаття прийнята до друку 19.08.2026 року
Опубліковано 29.09.2026 року