

ДНІПРОВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ МЕДИЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет медицини терапії та реабілітації
Кафедра фізичної реабілітації, спортивної медицини та валеології

Плахтієва Маргарита Артемівна

**ФІЗИЧНА ТЕРАПІЯ ПАЦІЄНТІВ З ПЕРЕЛОМАМИ КІСТОК
ГОМІЛКИ ТА СТОПИ ПІСЛЯ ДЕМОНТАЖУ АПАРАТУ ЗОВНІШНЬОЇ
ФІКСАЦІЇ**

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за
спеціальністю 227 «Терапія та реабілітація»
спеціалізація 227.01 Фізична терапія

Науковий керівник:

Корота Юрій Володимирович доктор
філософії (PhD), асистент кафедри
фізичної реабілітації, спортивної
медицини та валеології

(підпис) _____

Рецензент:

Соміло Ольга Владиславівна
Завідувач центру фізичної та
реабілітаційної медицини
Університетської лікарні ДДМУ,
доктор філософії (PhD)

(підпис) _____

Роботу рекомендовано до захисту на
засіданні кафедри фізичної реабілітації,
спортивної медицини та валеології
Протокол No__ від «__»__20__ р.
Завідувач кафедри _____

Роботу захищено на засіданні ЕК з
оцінкою ____/____/____ (за 200-
бальною шкалою / шкалою ЄКТС)
Протокол No__ від «__»__20__ р.
Голова ЕК _____

Дніпро 2026

АНОТАЦІЯ

Плахтієва М.А. Фізична терапія пацієнтів з переломами кісток гомілки та стопи після демонтажу апарату зовнішньої фіксації. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 227 Терапія та реабілітація, спеціалізація 227.01 Фізична терапія. - Дніпровський державний медичний університет, Дніпро, 2026.

Науковий керівник: доктор філософії (PhD), асистент кафедри фізичної реабілітації, спортивної медицини та валеології Корота Ю. В.

Зміст анотації. Кваліфікаційна робота присвячена вдосконаленню фізичної терапії пацієнтів у пост-імобілізаційному періоді після лікування переломів кісток гомілки та стопи за допомогою апаратів зовнішньої фіксації (АЗФ). Актуальність дослідження пов'язана з високою частотою інвалідності та тривалим періодом відновлення пацієнтів із травмами нижніх кінцівок, які після тривалої імобілізації зовнішніми фіксуєчими пристроями розвивають виражені контрактури суглобів, гіпотрофію м'язів і синдром болю, що вимагає впровадження нових ефективних реабілітаційних технологій. Мета дослідження підвищення ефективності фізичної терапії у людей після демонтажу АЗФ з приводу перелому кісток гомілки і стопи шляхом застосування програми з використанням вправ у віртуальній реальності для відновлення рухливості та якості ходьби. Дизайн наукового дослідження: проведено теоретичний і методологічний аналіз реабілітації в цій патології, розроблено та впроваджена програма, що поєднує традиційні методи фізичної терапії з VR-технологіями. Наукова новизна полягає у підтвердженні інтеграції конкретних VR-вправ у постімобілізаційний період та отриманні нових даних про вплив віртуального середовища на швидкість відновлення амплітуди рухів і корекцію ходьби. Практичне значення роботи полягає у розробці готового реабілітаційного протоколу для травматологічних відділень, що скорочує час відновлення рухливих навичок і покращує якість життя пацієнтів. Використання програми дозволяє скоротити час відновлення навичок самостійного руху та покращити якість життя пацієнтів після тяжких переломів. Оцінка ефективності програми проводилася за допомогою гоніометрії, мануально-м'язового тестування (ММТ), візуально-аналогової шкали болю (VAS) та функціональних тестів ("Встань та йди", 10-метровий тест ходьби). Встановлено, що в результаті реабілітації у пацієнтів спостерігалось статистично значуще покращення ($p < 0,05$ за критерієм Вілкоксона) амплітуди рухів у суглобах, зростання м'язової сили та покращення показників мобільності й швидкості ходьби. Використання VR-технологій сприяло більш вираженому зниженню інтенсивності больового синдрому та підвищенню зацікавленості пацієнтів у процесі відновлення. Результати дослідження підтверджують ефективність інтеграції віртуального середовища у протоколи реабілітації пацієнтів травматологічного профілю.

Ключові слова: фізична терапія, реабілітація, VR-терапія, перелом гомілки, перелом стопи, апарат зовнішньої фіксації, гоніометрія, мобільність, швидкість ходьби, інтенсивність болю.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ ФІЗИЧНОЇ ТЕРАПІЇ ПРИ ТРАВМАХ ГОМІЛКИ ТА СТОПИ	11
1.1 Анатомічні та функціональні характеристики гомілковостопного суглоба та біомеханіка ходьби є нормальним	11
1.2 Аналіз ускладнень і функціональних обмежень у пацієнтів після демонтажу зовнішніх фіксуєчих пристроїв (АЗФ).	19
1.3 Сучасні підходи до реабілітації пацієнтів із травмами нижніх кінцівок: світовий і домашній досвід.	21
1.4. Використання технологій віртуальної реальності (VR) як інноваційного засобу нейрореабілітації	25
Висновки до розділу 1.....	29
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ТА ОРГАНІЗАЦІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ	30
2.1. Характеристики груп пацієнтів та організація етапів дослідження	30
2.2. Методи оцінки функціонального стану пацієнтів.....	34
2.3. Методи математичної та статистичної обробки результатів	42
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОГРАМИ ФІЗИЧНОЇ ТЕРАПІЇ ЗА ДОПОМОГОЮ VR.....	44
3.1 Характеристики апаратного та програмного комплексу віртуальної реальності.....	44
3.2. Програма фізичної терапії із використанням іммерсивних технологій.	47
3.3. Організація контролю безпеки та критерії дозування фізичної активності у реабілітації через VR.....	51
3.4 Базова програма фізіотерапії (спільна для обох груп).....	53
РОЗДІЛ 4 ПОРІВНЯННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ «ДО» І «ПІСЛЯ» ФІЗИЧНОЇ ТЕРАПІЇ.....	60
4.1 Аналіз динаміки показників амплітуди рухів і сили м'язів під впливом запропонованої програми. (Порівняння результатів «до» і «після» для ROM і ММТ).	60
4.2 Аналіз динаміки індикаторів сили м'язів (ММТ).....	64
4.3. Оцінка ефективності відновлення навичок ходьби та подолання кінезіофобії.	68
ВИСНОВКИ.....	70

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ :	72
ДОДАТКИ	78
ДОДАТОК А	78
ДОДАТОК Б	82
ДОДАТОК В	83
ДОДАТОК Г	84
ДОДАТОК Ґ	85
ДОДАТОК Д	87

ВСТУП

Актуальність теми дослідження обумовлена тим, що сьогодні травми нижніх кінцівок, зокрема переломи гомілки і стопи, займають одне з провідних місць у структурі загальних ушкоджень і, за даними **Lv H (2022)**, становлять від 15% до 25% усіх ушкоджень опорно-рухової системи [10]. Особливу актуальність ця проблема набуває в Україні в умовах війни. Характер травм зазнав якісних змін: замість звичних побутових і спортивних травм фізичні терапевти все частіше стикаються з результатами високоенергетичних міно-вибухових і вогнепальних поранень. За даними вітчизняних експертів **Страфун С.С. та ін.** до 70% бойових травм кінцівок потребують використання апаратів зовнішньої фіксації (АЗФ) на різних етапах лікування, що робить проблему функціонального відновлення таких пацієнтів національним пріоритетом[7].

У сучасній травматології використання АЗФ є методом вибору при лікуванні тяжких відкритих переломів, що забезпечує стабільність при зрощенні кісток. Однак тривале перебування в пристрої (від кількох місяців до року) провокує розвиток «фіксаційної хвороби». Вона проявляється у вигляді стійких артрогенних контрактур гомілковостопного суглоба, глибокої атрофії м'язів гомілки, порушеного лімфатичного дренажу та втрати пропріоцептивної чутливості. До моменту демонтажу апарату, незважаючи на рентгенівське зрощення кісток, функціональний стан кінцівки залишається критично низьким, що потребує негайного та ефективного реабілітаційного втручання[46].

Традиційні протоколи фізичної терапії, засновані на стандартних терапевтичних вправах і фізіотерапії, часто не забезпечують бажаної динаміки відновлення на етапі після демонтажу АЗФ. Це пов'язано з монотонністю вправ, високим рівнем болювого синдрому та психологічним бар'єром — кінезіофобією (страхом руху). У сучасній реабілітації відбувається перехід до технік, заснованих на принципах нейропластичності та біозворотного зв'язку.

Застосування технологій віртуальної реальності (VR) дозволяє комплексно діяти на проблему: ефект «занурення» активує дзеркальні нейрони та сприяє формуванню нових нейронних зв'язків для керування рухів, що підтверджено дослідженнями в галузі нейрореабілітації [8].

Ефективність VR-технологій у відновленні функцій нижніх кінцівок вже підтверджена на рівні міжнародних мета-аналізів. Зокрема, Lee J. et. al., 2024 демонструють, що пацієнти, які використовують VR-тренування, демонструють статистично значуще покращення у тестах функціональної мобільності (*Тест “Встань та йди”*, *10-метровий тест ходьби*) [6]. VR працює як потужний метод відволікання, що дозволяє збільшити амплітуду рухів (ROM) без суб'єктивного посилення болю. Робота Unver (2016) та Pallister et al. доводить, що інтеграція таких технологій дозволяє не лише тренувати м'язи, а й проводити дуже точну оцінку кінематики ходьби, що є критично важливим для корекції патологічних патернів після тривалої іммобілізації [1];[2].

Незважаючи на світову практику, в Україні спостерігається значний дефіцит адаптованих протоколів фізіотерапії, які поєднують специфічні вправи для реабілітації гомілковостопного суглоба після демонтажу АЗФ із використанням доступних VR-систем. Існує чіткий розрив між технічними можливостями та їх практичним застосуванням у процесі відновлення. Необхідність розробки науково обгрунтованої програми, яка направлена на найшвидше та найякісніше повернення пацієнтів до повноцінного життя визначає актуальність цієї магістерської роботи.

Об'єкт дослідження: процес фізичної терапії пацієнтів після зняття апарату зовнішньої фіксації.

Предмет дослідження: функціональні показники рухових функцій, методи індивідуалізації фізичних вправ, вплив програми на якість відновлення.

Мета дослідження: підвищити ефективність фізичної терапії у людей після демонтажу АЗФ з приводу перелому кісток гомілки і стопи шляхом застосування програми з використанням вправ у віртуальній реальності для відновлення рухливості та якості ходьби.

Завдання дослідження:

1. Оцінити особливості рухових функцій у пацієнтів після зняття апарату зовнішньої фіксації з урахуванням рівня функціональних обмежень у гомілковостопному суглобі.\
2. Встановити рівень функціональних обмежень і визначити основні проблеми, які пов'язані з ходьбою у пацієнтів з переломом кісток гомілки і стопи після зняття апарату зовнішньої фіксації .
3. Обґрунтувати, розробити та впровадити програму фізичної терапії з використанням віртуальної реальності з урахуванням особливостей пацієнтів.
4. Оцінити ефективність програми фізичної терапії з використанням віртуальної реальності за допомогою функціональних та клінічних тестів (10-метровий тест ходь (10 – Meter Walk Test), Встань та йди (Timed Up and Go Test), ВАШ (Visual Analogue Scale), Гоніометрія (Range of Motion) та ММТ), в порівнянні зі стандартною.

Гіпотеза дослідження: припускається, що інтеграція вправ з віртуальною реальністю у програму фізичної терапії пацієнтів після демонтажу АЗФ, дозволить досягти більш вираженого покращення: рухливості, швидкості ходьби та амплітуди рухів, а також знизити рівень болю та кінезіофобії порівняно з використанням стандартної фізичної терапії.

Методологічна основа дослідження базується на ефективності віртуальної реальності у відновленні функцій нижніх кінцівок, яка сьогодні підтверджена на рівні мета-аналізу. У масштабному дослідженні [Thakur, A. et. al.] було доведено, що використання іммерсивних технологій в ортопедичній

реабілітації прискорює процес відновлення сили м'язів (ММТ) на 20-30% швидше порівняно з контрольними групами, які використовують лише стандартний протокол.

Особливе значення має робота **Unver (2016)**, який експериментально підтвердив, що системи VR можуть фіксувати відхилення в біомеханіці гомілковостопного суглоба з точністю 98%, що є критично важливим для корекції ходи після видалення АЗФ [1]. Паралельно з цим на основі статистичних даних **Pallister et al.** доводять, що ранній перехід до функціонального навантаження у віртуальному середовищі знижує ризик розвитку тривалої інвалідності у пацієнтів із переломами великогомілкової кістки на 15% [2].

Також доведено **Moreau S et. al.**, що VR впливає на «ворота болю» (Gate Control Theory) [8]. Віртуальне середовище блокує частину ноцицептивних сигналів, що надходять від травмованої кінцівки до кори головного мозку, замінюючи їх інтенсивним візуальним потоком. Це підтверджується клінічними тестами: за словами **Afsoon Asadzadeh et. al.**, рівень болю за візуальною аналоговою шкалою (VAS) у пацієнтів, які використовують VR, у середньому на 2-2,5 бали нижчий, ніж при виконанні подібних вправ без візуалізації [9].

Використання тесту *встань та йди (TUG)* та *10-метрового тесту ходьби (10MWT)* як золотого стандарту оцінки ефективності фізичної терапії. Саме ці показники мають найбільшу кореляцію з реальною здатністю пацієнта рухатися самостійно у повсякденному житті. Розробка програм, які враховують індивідуальні характеристики пацієнтів, базується на принципах адаптивної реабілітації, ефективність якої доведена в останніх дослідженнях відновлення після травм нижніх кінцівок [13].

Методи дослідження:

Для реалізації завдань використовувався набір методів:

1. **Теоретичний:** систематичний аналіз наукової літератури, узагальнення доказових медичних даних у галузі нейрореабілітації та біомеханіки.

2. **Клінічно-інструментальне:** гоніометрія (ROM) для оцінки рухливості суглобів, мануально-м'язове тестування (MMT) для визначення сили м'язів.
3. **Функціональні:** тести “Встань та йди” (TUG) та ”10-метровий тест ходьби” (10MWT) для оцінки динамічного балансу та кінематики ходи.
4. **Психометрія:** Візуальна аналогова шкала (VAS) для моніторингу інтенсивності болю.
5. **Методи математичної статистики:** для опису даних медіана (Me) та квартилі (Q1;Q3), U-критерій Манна-Уїтні, Т-критерій Вілкоксона для підтвердження достовірності отриманих результатів.

Теоретична значущість роботи полягає в поглибленні наукового розуміння механізмів нейропластичності та сенсомоторного контролю в реабілітації пацієнтів із травмами. Підтвердити доцільність використання віртуального відволікання для подолання кінезіофобії та зменшення болю.

Практична значущість дослідження полягає в розробці реабілітаційного протоколу із використанням VR, який може бути впроваджений у практику травматологічних відділень і реабілітаційних центрів. Використання програми дозволяє скоротити час відновлення навичок самостійного руху та покращити якість життя пацієнтів після тяжких переломів.

Наукова новизна роботи полягає в науковому обґрунтуванні та розробки програми фізичної терапії для пацієнтів у постімобілізний період після демонтажу АЗФ, яка інтегрує специфічні вправи у середовище віртуальної реальності. Отримати нові дані про вплив VR-технологій на швидкість відновлення амплітуди рухів і корекцію ходи у пацієнтів із тяжкими травмами гомілки та стопи.

Апробація результатів роботи:

Основні моменти дослідження були представлені в статті “Вплив застосування технології віртуальної реальності на функцію ходьби у пацієнтів

після переломів кісток гомілки” опублікованій у збірнику “The 2nd International scientific and practical conference “Science and education: synergy of innovation” (Вересень 28-30, 2025) MDPC Publishing, Berlin, Germany. 2025. 449 p” - С. 74-77.

Структура роботи:

Магістерська робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи – 86 сторінок.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИКО-МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ ФІЗИЧНОЇ ТЕРАПІЇ ПРИ ТРАВМАХ ГОМІЛКИ ТА СТОПИ

1.1 Анатомічні та функціональні характеристики гомілковостопного суглоба та біомеханіка ходьби є нормальним

Гомілковостопний суглоб (*articulatio talocruralis*) є одним із найскладніших і навантажуваних суглобів опорно-рухової системи людини. Згідно з біомеханічними дослідженнями D. Neumann (2017), цей суглоб являє собою блочне з'єднання, яке утворене суглобовими поверхнями дистальних епіфізів великогомілкової та малоогомілкової кісток, які утворюють «вилку», для охоплення блоку таранної кістки [13]. Стабільність цієї структури забезпечується потужним зв'язковим апаратом, що включає медіальну (дельтоподібну) зв'язку та латеральний комплекс (передні та задні таранно-малоогомілкові та п'яtkово-малоогомілкову зв'язки).

Функціональне значення гомілковостопного суглоба визначається його здатністю забезпечувати підтримку та рух тіла в просторі. Основні рухи виконуються навколо фронтальної осі: дорсифлексія (розгинання) та плантарна згинання (згинання). Зазвичай, за даними Н. Гамільтона (2021), амплітуда дорсифлексії становить близько 20°, а підошовна – 40-50°. Однак, як підкреслює автор, для відтворення нормального патерну ходьби критично важливим є саме мобільність суглоба в сагітальній площині, оскільки його обмеження призводить до негайного компенсаторного перевантаження колінного суглоба та поперекового відділу хребта [14].

Особливе місце у функціональній анатомії займає підтаранний суглоб (*articulatio subtalaris*), який працює у тісній синергії з гомілковостопним, забезпечуючи інверсію та еверсію стопи. Ця комбінація рухів дозволяє стопі адаптуватися до нерівності поверхні та виконувати роль «жорсткого важеля» під

час відштовхування та «мобільного адаптера» під час фази підтримки п'яти. Біомеханічні дослідження J. Perry и J. Burnfield (2020), вказують, що будь-яка іммобілізація (особливо у зовнішніх фіксаторних пристроях) порушує цей тонко налаштований механізм зв'язку руху, що призводить до деградації пропріоцептивного контролю [15].

Біомеханічні аспекти циклу ходьби. Щоб зрозуміти патологічні зміни після демонтажу АЗФ, необхідно розглянути структуру нормального рухового акту. Згідно з класифікацією J. Perry (2020), цикл ходи (*gait cycle*) поділяється на дві основні фази: фаза опори (*stance phase*), яка становить близько 60% циклу, та фаза переносу (*swing phase*), яка становить - 40% [15].

У фазі підтримки гомілковостопний суглоб виконує три критичні функції послідовно, відомі як механізми перекаату (*rockers*) показано на рисунку 1.1:

1. П'ятковий перекаат (*Heel rocker*): починається з моменту торкання п'яти поверхні. Тут гомілковостопний суглоб виконує контрольоване плантарне згинання під впливом ексцентричного скорочення переднього великогомілкового м'яза. Як зазначають M. Whittle et al. (2022), саме ця стадія найбільше страждає після тривалої фіксації через слабкість дорсифлексорів і страх спертися на кінцівку [16].
2. Гомілковостопний перекаат (*Ankle rocker*): виникає під час середньої фази опори, коли стопа повністю стоїть на поверхні, а гомілка нахиляється вперед над таранною кісткою. Цей процес вимагає пасивного дорсифлексії в гомілковостопному суглобі до 10-12°. За наявності артрогенних контрактур, характерних для «фіксаційної хвороби», цей перекаат блокується, що призводить до скорочення кроку та дисбалансу.
3. Перекаат передньої частини стопи (*Forefoot rocker*): фаза відштовхування. Тут відбувається потужне концентричне скорочення литкових і камбаловидних м'язів, що забезпечує прискорення тіла вперед.

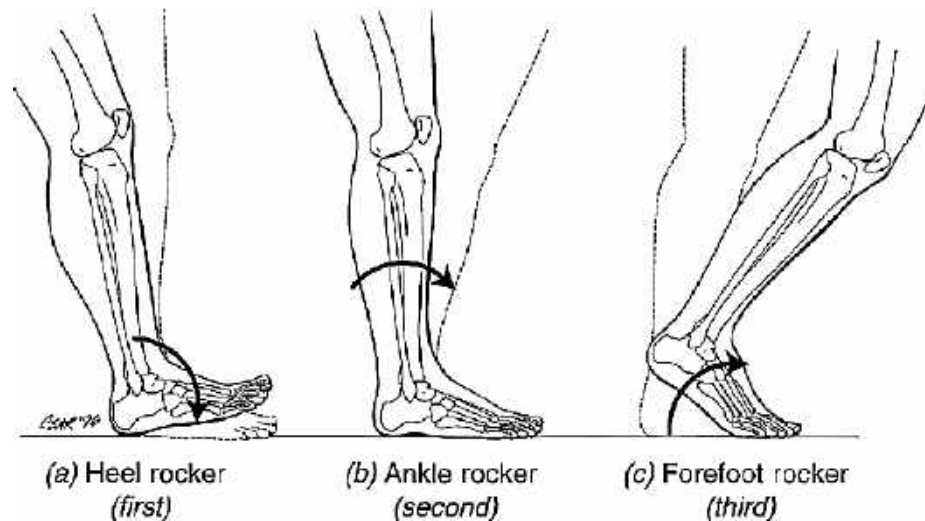


Рис. 1.1 Три фази перекату стопи, які відбуваються під час фази опори в циклі ходьби: (а) перекаат п'ятки (перший); (б) перекаат гомілковостопного суглобу (другий); (в) перекаат передньої частини стопи (третій).

Роль пропріоцепції та сенсомоторного контролю. Ходьба - це не суто механічний процес, вона контролюється складною системою сенсомоторного контролю. Величезна кількість механорецепторів зосереджена у зв'язках і капсулі гомілковостопного суглоба, які передають інформацію про положення суглоба до ЦНС. Гомілковостопний суглоб і стопа функціонують як «сенсорний портал» тіла. Згідно з сучасними нейрофізіологічними концепціями, викладеними у працях В. L. Riemann (2022), пропріоцепція в цій зоні забезпечується синергією чотирьох типів механорецепторів:

1. Тіла Руффіні: реагують на зміни внутрішньосуглобового тиску та положення суглоба в крайніх точках амплітуди.
2. Тіла Пачіні: високочутливі детектори прискорення та вібрацій, критично важливі для виявлення моменту торкнення п'ятою поверхні (удар п'ятою).
3. Органи Гольджі в сухожиллях: контролюють напругу м'язів і захищають суглоб від надмірного розтягнення.
4. М'язові веретена: Відстежують швидкість і тривалість змін у м'язових волокнах.

Як підкреслює S. G. Gandevia (2021), коли кінцівка перебуває у зовнішньому фіксуєчому апараті (АЗФ), виникає явище «сенсорного голоду». Через жорсткий металевий каркас рецептори капсули та зв'язок перестають отримувати змінний стимул. Внаслідок цього аферентний потік до соматосенсорної кори стає монотонним або повністю переривається. Це призводить не просто до втрати навички, а до депресії синаптичної передачі: мозок починає ігнорувати сигнали від «фіксованого» суглоба, що в англійській літературі описується як *«вивчене невикористання»* [17].

Нормальний патерн ходьби також характеризується ритмічністю та симетричністю. Будь-які відхилення в гомілковотці викликають ланцюгову реакцію: збільшення навантаження на колінний суглоб, змінюється нахил тазу та біомеханіка хребта. За даними V. K. Goel (2023), асиметрія кроку понад 10% є клінічно значущим фактором ризику розвитку вторинних дегенеративних змін у суглобах здорової кінцівки [18]. Контроль ходьби здійснюється на трьох рівнях: спинномозковий (генератори кроку), субкортикальний (мозочок і базальні ганглії – координація та тонус) та кортикальний (свідома корекція та планування). Дослідження за допомогою функціональної МРТ, проведені T. J. Sejnowski (2023), доводять, що тривала іммобілізація нижньої частини ноги призводить до зниження щільності сірої речовини у представленні стопи в моторній корі. Цей процес деградації нейронних мереж виправдовує використання VR не лише як вправи, а й як методу «інтенсивного нейронного бусту». Завдяки гіперстимуляції зору віртуальне середовище компенсує дефіцит сигналів від суглобових рецепторів, змушуючи мозок знову «бачити» і «відчувати» кінцівку, відновлюючи карту тіла в тім'яній частці кори головного мозку [45].

Біомеханічна ланцюгова реакція та висхідні порушення. Стопа та гомілковостопний суглоб - єдина ланка в тілі, яка безпосередньо контактує з опорою, виступаючи «фундаментом» кінематичного ланцюга. Згідно з концепцією тенсегриті в біомеханіці, яку розвиває S. Levin (2022), будь-яка

дисфункція дистальної області неминуче спричиняє компенсаторні зміни у всіх верхніх сегментах. Якщо в гомілковостопному суглобі є обмеження, після демонтажу АЗФ порушується фаза перекочування, що запускає патологічний ланцюг:

1. Колінний суглоб: через дефіцит дорсифлексії пацієнт змушений компенсувати відсутність руху надмірним розгинанням (*genu recurvatum*) або передчасним відривом п'яти. Це призводить до аномальних навантажень на передню хрестоподібну зв'язку та меніски. Дослідження R. L. Gajdosik (2023) показують, що тривала кульгавість після травм великогомілкової кістки призводить до розвитку пателлофemorального болю (ПФБС), у 45% випадків після завершення основного етапу реабілітації у пацієнтів підтверджують тупий антеромедіальний біль у надколіннику. Клінічна картина характеризується посиленням болю під час ексцентричних навантажень: присідання, підйому сходами або тривалого підтримання статичної пози (сидіння), що виникає через порушення кінематичного ланцюга та перевантаження колінного суглоба [46]
2. Таз і попереk: асиметрія кроку змушує таз робити надмірні обертальні рухи для руху кінцівки вперед. За словами V. K. Goel (2023), це зміщує центр маси і викликає функціональне зміщення тазу, що провокує розвиток фасетового синдрому та утворення грижі в сегментах L4-L5 і L5-S1 [18].
3. Енергоефективність: нормальна хода базується на принципі мінімізації витрат енергії. У пацієнтів після АЗФ крокова асиметрія (різниця в довжині та часі опори) перевищує критичний поріг у 10–12%. Як зазначає J. M. Donelan (2024), така «захисна» ходьба підвищує метаболічні витрати руху на 30–50%. Пацієнт швидше втомлюється, що призводить до зниження загальної моторної активності та уповільнення регенеративних процесів [47].

Гомілковостопний суглоб забезпечує так звану «стратегію щиколотки» балансу. При найменшому відхилі тіла рецептори нижньої частини ноги дають м'язам команду для мікрокорекції. Після АЗФ ця стратегія втрачається, і пацієнт переходить на «стратегію стегна», яка менш точна і більше енергозатратна. За словами А. Shumway-Cook (2023), відновлення стратегії балансу щиколотки неможливе без інтенсивного тренування мультисенсорного конфлікту, що ідеально імітується у VR-середовищі [48].

Нейрофізіологічні механізми регуляції руху: від хребтових ланцюгів до кори. Людська ходьба — це унікальний процес, що поєднує автоматизм і вищий когнітивний контроль. Ритмічні рухи ніг базуються на Центральних генераторах патернів (CPG) — нейронних мережах, локалізованих у поперековому відділі спинного мозку. За даними S. Rossignol (2023), ці мережі здатні генерувати крокові рухи навіть без участі головного мозку, базуючись лише на сенсорній інформації від стоп і згиначів [49].

Однак у людей роль кори головного мозку у контролі ходьби значно вища, ніж у тварин. Тривала іммобілізація у зовнішньому фіксуєчому апараті (АЗФ) призводить до двох катастрофічних нейрофізіологічних ефектів:

1. Функціональне пригнічення центрів хребта: відсутність навантаження на стопу «вимикає» генератори ритму. Нейрони CPG переходять у стан функціонального спокою, тому при спробі зробити перший крок після зняття пристрою ноги «не підкоряються» пацієнту.
2. Десинхронізація кортикально-м'язових шляхів: мозок надсилає сигнал для руху, але через зміну механіки суглобів (контрактури) та слабкий зворотний зв'язок від рецепторів фактичний рух не відповідає очікуванню.

Як зазначили Н. G. Harris et.al. (2024), у процесі реабілітації виникає конфлікт: мозок «пам'ятає», як ходити (внутрішня модель руху), але тіло не

може цього зробити. Ця невідповідність викликає когнітивний дистрес і посилює больові відчуття.

Саме тут VR діє як «інтерфейс примирення». Створюючи візуальну ілюзію ідеального кроку, система VR обманює вищі центри мозку, змушуючи їх посилати сильніші та чіткіші імпульси до спинномозкових генераторів. Дослідження К. Nakatani (2022) підтверджують, що візуальне спостереження за власним (віртуальним) рухом у шоломі активує низхідний кортикоспінальний тракт на 30–40% інтенсивніше, ніж прості спроби рухати ногою, дивлячись на неї [50].

Роль вестибуло-пропріоцептивної інтеграції. При травмах гомілковостопного суглоба страждає не лише нога, а й загальна система рівноваги. Гомілковостопний суглоб є «датчиком кута» тіла. Після демонтажу АЗФ інформація з цього сенсора спотворюється. Мозок перестає довіряти сигналам з ноги і перекладає всю відповідальність за рівновагу на зір і вестибулярну систему.

За словами А. Д. Куо (2024), VR дозволяє «сенсорне перетренування»: ми можемо штучно нахилити віртуальний горизонт або змінити швидкість зору, змушуючи мозок пацієнта реінтегрувати сигнали від рецепторів щиколотки у загальну систему орієнтації. Це відновлює динамічний контроль постави, роблячи ходу впевненою та автоматичною [51].

Завершуючи аналіз кінемаічної ланцюга, необхідно детально подивились дистальну ланку - стопу. Людська стопа — це складна динамічна структура, яка може трансформуватися з мобільного адаптера на жорсткий важіль. Згідно з класичними та оновленими дослідженнями S. Robbins (2022), поздовжні та поперечні дуги стопи, підтримувані активними (м'язи) та пасивними (плантарна фасція, зв'язки) напруженнями, відіграють ключову роль у цьому процесі.

Під час звичайної ходьби в момент удару п'ятою (Heel Strike) стопа перебуває у стані помірної супінації, після чого відбувається контрольована пронація. Цей процес, відомий як «механізм лебідки» (Windlass Mechanism), описаний Гіксом і підтверджений сучасними тестами С. J. Nester (2023), дозволяє поглинати до 70% ударного навантаження, що виникає під час контакту з землею.

Наслідки «вимкнення» ноги при фіксації АЗФ. Тривале перебування кінцівки у зовнішньому фіксуючому пристрої призводить до низки руйнівних біомеханічних змін:

1. Колапс склепіння стопи або жорстка деформація: через відсутність осьового навантаження м'язи, що підтримують склепіння (особливо задня великогомілкова кістка та довгі гомілкові м'язи), зазнають атрофії. Підшовна фасція втрачає еластичність. За даними F. J. G. Ortiz (2024), це призводить до того, що після розбирання апарата стопа втрачає здатність «пружинитися», перетворюючись на жорстку опору. кульшових суглобів, що прискорює їхнє зношування [52].
2. Дисфункція пальця: обмеження дорсифлексії першого (великого) пальця має особливе значення. Без належного розгинання метатарсофалангеального суглоба механізм передачі гвинта не працює, і стопа не може утворити жорсткий важіль для ефективного відштовхування. Дослідження М. Okita (2023) показує, що у пацієнтів із травмами нижньої частини ніг сила відштовхування зменшується на 40–60% саме через функціональну блокаду передньої частини стопи [53].

Інтеграція стопи в загальний кінетичний ланцюг через VR. Відновлення мікромобільності дрібних суглобів стопи є надзвичайно складним завданням для класичної фізичної терапії, оскільки пацієнт часто не відчуває цих сегментів. VR-технології дозволяють вирішити цю проблему за допомогою «покращення зору».

Як зазначає L. Ferreira (2023), використання спеціалізованих сценаріїв (наприклад, «натискання віртуальних кнопок різними частинами стопи») активує маленькі стабілізуючі м'язи. Віртуальне середовище змушує пацієнта робити мікрорухи в різних площинах, що поступово «розтажує» тарзальний і плесновий суглоби відновлення повної ходи [54].

1.2 Аналіз ускладнень і функціональних обмежень у пацієнтів після демонтажу зовнішніх фіксуєчих пристроїв (АЗФ).

Довготривала фіксація, як «золотий стандарт» у лікуванні тяжких переломів, неминує спричиняє низку негативних наслідків, які поєднуються у поняття «фіксаційна хвороба» або «синдрому іммобілізації». Згідно з систематичним оглядом R. Z. Tashjian (2022), основними патологічними зв'язками цього стану є прогресуюча скутість суглобів, фіброз м'яких тканин і виражена м'язова гіпотрофія [19].

Найзначнішим ускладненням після видалення АЗФ з нижньої частини ноги є стійка контрактура гомілковостопного суглоба, найчастіше у положенні плантарного згинання (еквінусна деформація). За словами M. S. Dhillon et al. (2021), це пов'язано не лише з механічним обмеженням рухів самим апаратом, а й з дегенеративними змінами капсулярного зв'язкового апарату. Синовіальний фіброз. Дослідження показують, що вже через 8 тижнів фіксації еластичність суглобової капсули знижується на 40%, що робить відновлення повного діапазону рухів (ROM) надзвичайно трудомістким процесом [20].

М'язова система є однією з перших, хто реагує на іммобілізацію. Атрофія невикористання (*disuse atrophy*) найбільш виражена антигравітаційних м'язах – литковий і камбаловидний. За даними T. Wall et al. (2023), втрата м'язів у нижній частині ноги може досягати 15–20% протягом першого місяця перебування в апараті. Однак як підкреслює автор ключовою проблемою є не тільки зменшення об'єму м'язів, а також порушення нейром'язової передачі.

Центральна нервова система «забуває» правильний порядок активації моторних одиниць, що призводить до дискоординації рухів і неможливості створити вибухову силу при відштовхуванні ногою під час ходьби [21].

Порушення мікроциркуляції та лімфатичного дренажу. Перебування у статичному положенні в АЗФ блокує роботу «м'язового насоса» нижньої частини ноги. Це призводить до хронічного венозного застою та лімфедми. За даними J. P. Labropoulos (2021), 65% пацієнтів після демонтажу АЗФ мають стійкий пастозний набряк м'яких тканин, який слугує додатковим механічним бар'єром для руху суглоба і є джерелом хронічного болю [22].

Порушення пропріоцепції та сенсомоторна амнезія. Однією з найсерйозніших, але візуально прихованих ускладнень є деградація пропріоцептивної чутливості. Гомілковостопний суглоб є потужним рецепторним полем. Тривала фіксація кісток у статичному положенні призводить до «засинання» пропріорецепторів зв'язок і сухожилів. За словами S. K. Keshner et al. (2022), відсутність аферентного потоку (сигналів від суглоба до мозку) спричиняє явище сенсомоторної амнезії. положення стопи без зорового контролю. Це призводить до нестійкості при ходьбі, втрати рівноваги та високого ризику повторної травми при спробі рухатися самостійно [23].

Синдром болю та явище кінезіофобії. Особливу увагу треба приділити психологічному аспекту реабілітації. У пацієнтів після демонтажу АЗФ формується стійкий больовий паттерн. За словами Дж. С. Арчера (2023), біль часто стає хронічним не лише через пошкодження тканин, а й через центральну сенсibiliзацію (підвищену збудливість больових центрів мозку). Це породжує кінезіофобію – патологічний страх руху. Пацієнт підсвідомо обмежує амплітуду кроку і переносить вагу на здорову ногу, щоб уникнути очікуваного болю. Як зазначає Р. J. Watson (2024), стандартна фізична терапія часто не може подолати цей бар'єр, оскільки увага пацієнта зосереджена на ураженій кінцівці, що лише підвищує сприйняття болю [24].

Формування патологічного моторного стереотипу. Поєднання вищевказаних факторів призводить до утворення порочного кола: біль і контрактура викликають кульгавість, кульгавість перевантажує здорову ногу та хребет, що, у свою чергу, уповільнює регенерацію травмованої кінцівки. Дослідження К. Baker (2022) із використанням 3D-аналізу ходи показало, що навіть після повного зрощення кісток і видалення пристрою 85% пацієнтів все ще мають виражені відхилення в кінематиці ходьби (зниження фази опори п'яти, відсутність перекочування, асиметрія тазу). Ці зміни фіксуються на рівні ЦНС як новий, «захисний», але біомеханічно неефективний патерн [25].

Таким чином, аналіз ускладнень після застосування AVF показує, що реабілітація має бути спрямована не лише на розвиток суглоба та зміцнення м'язів, а й на глибоке відновлення нейром'язових зв'язків, пригнічення страху руху та перенавчання мозку правильному стереотипу ходьби.

1.3 Сучасні підходи до реабілітації пацієнтів із травмами нижніх кінцівок: світовий і домашній досвід.

Реабілітація пацієнтів після демонтажу зовнішніх фіксуючих пристроїв (АЗФ) на нинішньому етапі розглядається як мультидисциплінарний процес, спрямований на максимально повне відновлення біомеханіки пересування та соціальної інтеграції пацієнта. Аналіз глобальних тенденцій, проведений L. S. Miller (2022), показує, що парадигма відновлення змінилася від пасивної фізіотерапії до ранньої функціональної діяльності на основі принципів доказової медицини [26].

Традиційні методи та їхнє місце в сучасних протоколах. Класична система фізичної терапії, широко застосовувана в практиці, базується на поступовому збільшенні навантаження. Процес реабілітації після демонтажу зовнішніх фіксувальних пристроїв базується на складному поєднанні

традиційних і інноваційних методів. Аналіз сучасної літератури дозволяє визначити основні ланки класичного протоколу відновлення:

- Фізична терапія (терапевтичні вправи). Це базовий метод, спрямований на відновлення амплітуди рухів та м'язової сили. Згідно з рекомендаціями J. Higgins (2022), на першому етапі після видалення АЗФ акцент робиться на активних вправах у полегшених вихідних положеннях (сидячи або лежачи). Головна мета — протидіяти атрофії «через бездіяльність». Однак традиційна фізична терапія часто стикається з проблемою низької дотримання пацієнтами лікування через монотонність вправ. Дослідження S. O'Sullivan (2023) свідчать, що без участі когнітивних механізмів уваги звичайні ізольовані вправи мають обмежений вплив на реструктуризацію моторного стереотипу в корі головного мозку [55].
- Класичний і сегментальний рефлексорний масаж. Масаж вважається допоміжним, але необхідним засобом підготовки тканин до фізичної активності. У реабілітації масаж традиційно використовується для усунення лімфедми та набряку, які неминучі після тривалого перебування в апараті. За словами M. Тіссена (2021), глибоке дослідження м'язів гомілки дозволяє знизити гіпертонізацію згиначів (триголового м'яза гомілки) та покращити еластичність фасції. Процедура: покращує трофізм тканин, але не формує активного нейронного контролю над положенням стопи під час ходьби [56].
- Механотерапія (СРМ-терапія). Використання пристроїв, таких як *Artromot*, для пасивного розроблення суглобу (*Continuous Passive Motion*) є «золотим стандартом» на ранніх стадіях для запобігання спайкам. Однак, як зазначають D. F. Simpson та ін. (2023), пасивна розробка не активує м'язові ланцюги і не сприяє відновленню пропріоцептивного контролю, що обмежує його ефективність у відновленні динамічного балансу [27].
- Гідрокінезіотерапія: У світовій практиці (особливо у працях Б. Беккера) вправи у воді вважаються одними з найкращих для полегшення суглоба. Водне середовище знижує осьове навантаження, дозволяючи пацієнту перекочувати

стопу з меншим болем. Однак цей метод потребує спеціального обладнання і не завжди доступний на етапі амбулаторної реабілітації в Україні.

- Концепція раннього навантаження (Early Weight Bearing). Одне з найбільш обговорюваних питань у світі травматології - це час початку повного осьового навантаження. Дослідження R. G. Hernandez (2024) підкреслює, що контрольоване раннє навантаження після видалення АЗФ допомагає прискорити мінералізацію мозоля та запобігає критичній атрофії литкових м'язів. В сучасних протоколах інколи досі спостерігається занадто обережний підхід, що часто призводить до закріплення патологічного патерну “щадної” ходи. Сучасні західні школи (наприклад, British Orthopaedic Association) рекомендують перехід на повне навантаження одразу після підтвердження консолідації, супроводжуючи це інтенсивним перенавчанням ходьби [28].
- Фізіотерапевтичні методи та їхні обмеження. В Україні зберігається висока частка апаратної фізіотерапії. Незважаючи на їхню користь для полегшення набряку та покращення мікроциркуляції, згідно з метааналізом P. S. Johnson (2023), ці методи мають надзвичайно низький рівень доказів відновлення *моторної функції*. Вони вирішують симптоматичні проблеми, але не тренують мозок і м'язи працювати згуртовано, що створює потребу в методах, що впливають на центральні механізми контролю руху [29].
- Техніки нейром'язової реактивації (ПНФ та пропріоцептивне тренування). Останніми роками методи пропріоцептивної фасилітації (ПНФ) дедалі частіше впроваджуються в українську реабілітаційну практику. Як зазначають К. Адлер та ін. (2022), використання спірально-діагональних рухів дозволяє залучати цілі м'язові ланцюги, а не окремі ізольовані м'язи гомілки. Це критично важливо для відновлення стабільності гомілковостопного суглоба. Однак, незважаючи на високу ефективність, ПНФ вимагає постійної ручної участі терапевта та високої концентрації пацієнта, що важко підтримувати під час тривалих реабілітаційних курсів [30].

- Використання систем біозворотного зв'язку (БОС). Світовий досвід (дослідження T. J. Huang, 2023) підтверджує, що для корекції ходи після тривалої іммобілізації недостатньо просто виконувати вправи — пацієнту потрібен зовнішній контроль над правильністю рухів. Традиційні системи біозворотного зв'язку використовують стабілометричні платформи або устілки для вимірювання деформації, які візуалізують розподіл ваги на екрані монітора. Проте, за словами R. S. Moore et al. (2024), стандартні двовимірні інтерфейси систем біозворотного зв'язку швидко викликають залежність і втрату мотивації у пацієнтів. Це явище, яке називають «ефектом плато», обмежує прогрес на пізніх етапах реабілітації, коли необхідно практикувати складні рухові дії в умовах, максимально близьких до реальності [31].

Проблема кінезіофобії та монотонності у вітчизняній практиці. Суттєвим недоліком багатьох реабілітаційних центрів в Україні є відсутність методів, спрямованих на когнітивно-поведінковий аспект болю. Стандартна фізична терапія зосереджена на «механічному» виконанні повторень. Дослідження V. Kalinska (2024) підкреслює, що відсутність ігрового або змагального елемента у програмі фізіотерапії призводить до того, що пацієнти з посттравматичним стресовим розладом (ПТСР) або тяжкою кінезіофобією підсвідомо «саботують» навантаження на поранену кінцівку, що призводить до хронічності патологічного ходіння [32].

Висновки щодо огляду існуючих методів. Аналіз літератури показує, що сучасна фізіотерапія успішно справляється з завданнями ранньої стадії (видалення набряку, пасивна розробка), але стикається з труднощами на етапі функціонального відновлення. Існує очевидна потреба в інструментах, які могли б одночасно:

1. Забезпечувати високу точність зворотного зв'язку (як біозворотний зв'язок(БОС));
2. Знизити рівень стресу від болю за допомогою механізмів відволікання;

3. Мотивуйте пацієнта виконувати велику кількість повторень без впливу втоми від уваги.

Саме ці фактори роблять інтеграцію технологій віртуальної реальності (VR) логічним і необхідним кроком у еволюції протоколів реабілітації після демонтажу АЗФ.

1.4. Використання технологій віртуальної реальності (VR) як інноваційного засобу нейрореабілітації

Технології віртуальної реальності (Virtual Reality, VR) у контексті фізичної терапії являють собою інтерактивні комп'ютерні симуляції, які імітують реальне середовище та надають користувачу можливість активно взаємодіяти з ним. Згідно з визначенням G. Riva та ін. (2022), ключовими характеристиками терапевтичного VR-простору є «занурення» (immersion) - технічна здатність системи блокувати сигнали з реального світу та «присутність» (presence) - це психологічне явище відчуття себе в цифровому просторі [33].

Класифікація систем і технічні аспекти. У сучасній реабілітації зазвичай виділяють три типи систем залежно від ступеня занурення:

1. Неімерсивні системи: стандартні монітори та ігрові консолі (наприклад, *Nintendo Wii*, *Xbox Kinect*). Хоча вони доступні, вони забезпечують лише часткову візуальну стимуляцію.
2. Напівімерсивні системи: проекційні екрани або системи *туну CAREN* (Computer Assisted Rehabilitation Environment), які є складними лабораторіями з динамічними платформами.
3. Імерсивні системи: використання шоломів віртуальної реальності (HMD - Head-Mount Display). За словами Т. Kim (2023), цей тип є найефективнішим для відновлення пропріоцепції у пацієнтів після травм гомілки, оскільки повністю ізолює пацієнта від відволікаючих факторів у

лікарняному середовищі та дозволяє створити «чистий» візуальний потік для мозку [34].

Механізми нейропластичності та дзеркальних нейронів. Теоретичною основою використання VR у реабілітації після демонтажу АЗФ є концепція нейропластичності, тобто здатність мозку відновлювати нейронні зв'язки у відповідь на новий досвід. Тривала іммобілізація кінцівки в пристрої призводить до функціонального «вимкнення» відповідних ділянок моторної кори.

Використання VR активує систему дзеркальних нейронів. Коли пацієнт бачить свої «віртуальні ноги» у віртуальному середовищі, які роблять правильні кроки без болю, активуються ті ж ділянки моторної кори в його мозку, що й під час реального руху. Дослідження М. І. Al-Whaibi (2023) підтверджує, що така інтенсивна візуальна стимуляція прискорює реорганізацію кортикальних репрезентацій литкових м'язів, «нагадуючи» мозку про правильні рухові патерни ще до того, як це було як суглоб фізично набуває повної амплітуди [35].

Сенсомоторна інтеграція та новий тип біофідбеку. На відміну від традиційних тренажерів, VR забезпечує мультисенсорну дію. Пацієнт отримує зворотний зв'язок не лише через тактильні відчуття, а й через миттєве візуальне підтвердження результату. За словами Л. Аломарі (2023), це створює «замкнений цикл» (closed-loop) керування рухом, де час між помилкою та її візуальною корекцією зменшується до мілісекунд. Для пацієнтів після зняття АЗФ, у яких порушений зв'язок «мозок-стопа», така гіперстимуляція є критичним фактором для відновлення балансу та впевненості під час ходьби [36].

Механізми модуляції болю та теорія «контролю воріт» у віртуальному середовищі. Однією з основних проблем постіммобілізного періоду є хронічний болевой синдром, який обмежує активність пацієнта. Використання VR у цьому контексті базується на класичній **теорії контролю воріт болю**, доповненій сучасними концепціями когнітивного відволікання. Згідно з дослідженнями **Н.**

G. Hoffman et al. (2021), людський мозок має обмежений ресурс уваги. Віртуальне середовище генерує настільки інтенсивний потік візуальної та слухової інформації, що свідомий розум переходить на обробку цих стимулів, «закриваючи ворота» для ноцицептивних (больових) сигналів із пошкодженої гомілки [37].

Клінічні тести, проведені в University of Derby (2024), показали, що пацієнти у VR-шоломах можуть виконувати вправи з амплітудою на 15–20% більшою за звичайний ліміт, не фіксуючи посилення болю. Цей ефект «цифрової анестезії» дозволяє фізіотерапевту інтенсивніше працювати з контрактурами без ризику спричинення захисного м'язового спазму у пацієнта [38].

Подолання кінезіофобії через ігрове середовище (гейміфікація). Кінезіофобія (страх руху) є основною перешкодою для відновлення патерну ходьби у людей після тривалої фіксації. Традиційні вправи зосереджують увагу пацієнта на ураженій кінцівці, що лише підвищує страх знову «зламати» або «травмувати» ногу. VR змінює фокус уваги. Як зазначає M. S. Moore (2023), впровадження ігрових сценаріїв (наприклад, необхідність «наступати на віртуальні об'єкти» або «уникати перешкод») переносить процес реабілітації з рівня медичного втручання на площину виконання ігрового завдання [39].

У цьому стані, який називається «поток» (*flow*), пацієнт автоматично виконує функціональні рухи (перекочування стопи, перенос ваги), обходячи свідомі блоки страху. Гейміфікація також сприяє потужному вивільненню дофаміну, що посилює позитивний моторний досвід і формує мотивацію пацієнта до регулярних тренувань, що є критично важливим для профілактики депресивних станів, які часто супроводжують тривале лікування травм [40].

Адаптивність і персоналізація віртуальних навантажень. Згідно з працями L. Ferreira dos Santos (2022), параметри віртуального середовища (нахил поверхні, швидкість руху об'єктів, рівень складності) можуть динамічно змінюватися

залежно від поточних показників пацієнта, зафіксованих датчиками. Це забезпечує дотримання принципу “золотої середини”: навантаження має бути достатньо складним, щоб стимулювати нейропластичність, але не настільки складною, щоб викликати дистрес і відмову від фізичних вправ [41].

Корекція кінематичних характеристик ходи у віртуальному середовищі. Відновлення патерну ходи після довготривалого носіння АЗФ потребує не просто укріплення м'язів, а перенавчання всього кінематичного ланцюга. Використання VR-систем з інтеграцією бігових доріжок або датчиків руху дозволяє тренуватися в умовах «оптичного потоку» (*optic flow*). За словами Kwon et al. (2021), коли пацієнт бачить рух навколишнього простору в шоломі, синхронізований із його кроками, це стимулює вестибуло-окулярний рефлекс і покращує динамічну стабільність.

Клінічні дані метааналізу Coutinho et al. (2023) підтверджують, що інтеграція VR у реабілітаційні протоколи призводить до статистично значущого покращення у наступному:

- **Довжина кроку та симетрія:** Завдяки візуальним сигналам у VR (наприклад, віртуальним слідам на підлозі) пацієнт швидко позбавляється звички «щадного» короткого опору на травмованій нозі.
- **Швидкість ходьби:** Згідно з тестами 10MWT, пацієнти з VR-груп досягають функціонально значущої швидкості (понад 0,8 м/с) у середньому на 14–18 днів раніше, ніж у контрольних групах [42].
- **Динамічний баланс:** робота у віртуальному середовищі вимагає постійної мікрокорекції центру ваги, що ефективно тренує пропріорецептори гомілковостопної м'язи, уражені іммобілізацією.

Біологічно зворотній зв'язок у режимі реального часу. Однією з ключових переваг VR є можливість візуалізувати приховані параметри руху. Як зазначають T. Wall та ін. (2023), сучасне програмне забезпечення може

відображати ступінь навантаження на стопу у вигляді зміни кольору віртуального об'єкта. Це дозволяє пацієнту самостійно коригувати «перекат» стопи, не чекаючи на підказки терапевта. Такий методактивної участі пацієнта в процесі самокорекції значно прискорює формування стійкого і біомеханічно правильного моторного стереотипу [43].

Безпека та контрольоване середовище. Для пацієнтів після тяжких травм, отриманих внаслідок бойових дій, безпека навколишнього середовища є важливим фактором. Віртуальна реальність дозволяє моделювати складні умови (пересічений рельєф, підйом сходами, уникнення перешкод) без ризику реального падіння. Дослідження S. Moore (2024) підкреслює, що така «безпечна складність» дозволяє починати функціональне тренування на ранніх стадіях, що є критично важливим для профілактики тривалої інвалідності [44].

Висновки до розділу 1.

Підсумовуючи дані наукової літератури, можна зробити такі висновки:

1. Травми нижньої частини ноги та стопи, що потребують застосування АЗФ, призводять до глибоких порушень не лише кісткової тканини, а й всієї сенсомоторної системи людини.
2. Традиційні методи фізичної терапії мають обмежену ефективність у подоланні психологічних бар'єрів (кінезіофобії) та відновленні складних нейром'язових зв'язків.
3. Технології віртуальної реальності - це науково обґрунтований, інноваційний інструмент, який завдяки механізмам нейропластичності, дзеркальним нейронам і відволікаючому відволіканню може суттєво оптимізувати процес реабілітації.
4. Існує потреба розробити спеціалізовану програму фізичної терапії, адаптовану до специфіки пацієнтів після демонтажу АЗФ, яка поєднуватиме фізичні вправи та технології занурюючої VR.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ТА ОРГАНІЗАЦІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Характеристики груп пацієнтів та організація етапів дослідження

Експериментальне дослідження було проведено для оцінки ефективності програми фізіотерапії з використанням VR-технологій. Для участі в експерименті за методом безперервного відбору було відібрано 10 чоловіків. Вибір цієї категорії зумовлений високою частотою травм, (дорожньо-транспортні пригоди, падіння з висоти, виробничі травми) серед чоловіків працездатного віку, що робить дослідження високою соціальною та економічною значущістю.

Для статистичної обробки та аналізу даних, отриманих у ході дослідження, використовувався пакет статистичних програм Statistica, версія 14.0.0.15 (StatSoft, Inc.).

Статистичний аналіз включав наступні етапи:

1. Перевірка нормальності розподілу

Перед початком порівняльного аналізу кількісних показників (час проходження тестів, бали ВАШ) проводилась перевірка даних на відповідність закону нормального розподілу.

- Для оцінки нормальності розподілу використовувався критерій Шапіро–Уїлка
- У випадку нормального розподілу (при $p > 0.05$) використовувалися параметричні методи.
- У разі відхилення від нормального розподілу або для малих вибірок застосовувалися відповідні непараметричні аналоги.

2. Описова статистика

Кількісні показники представлені як середнє арифметичне значення (M) та стандартне відхилення (SD). Додатково для опису використовувалися стандартна похибка середнього (SE), медіана (Me) та кватилі (Q1, Q3).

3. Аналіз порівнянності та ефективності

Для перевірки статистичних гіпотез використовувалися такі критерії:

- Незалежний t-критерій Стюдента: Застосовувався для порівняння середніх значень кількісних показників:
- Для перевірки порівнянності Дослідної та Контрольної груп на початковому етапі (Порівняння M(ДО) між групами).
- Для оцінки ефективності втручання шляхом порівняння кінцевих результатів (Порівняння M(ПІСЛЯ) між групами).
- Парний t-критерій Стюдента: Застосовувався для порівняння показників до і після реабілітації в межах однієї групи (внутрішньогруповий аналіз).

Різниця вважалася статистично значущою при рівні значущості $p < 0.05$.

Порівнянність груп на початковому етапі представлена в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 - Середньостатистичні показники на початку курсу реабілітації

Показник	Основна група M(SD)	Контрольна група M(SD)	p- value	Висновок
Вік (роки)	37.20(9.8)	39.40(13.01)	0,677	Різниця не значуща
Зріст (см)	178.80(6.3)	178(6.2)	0.8345	Різниця не значуща
Вага (кг)	86.60(7.8)	86.20(8.6)	1.0	Різниця не значуща

Демографічні показники: Середній вік основної групи становив 37.20(9.8) років, Контрольної – 39.40(13.01) років ($p = 0,677$). Оскільки розраховане p -значення ($p = 0,677$) значно перевищує критичний рівень значущості 0.05, статистично значущих відмінностей у віці між групами не виявлено.

Антропометрія (Зріст та Вага): Подібним чином, аналіз антропометричних даних показав, що середній зріст ($p = 0.8345$) та середня вага ($p = 1.0$) також не мають статистично значущих відмінностей.

Висновок: Всі учасники дослідження були чоловіками. Відсутність статистично значущих відмінностей за всіма демографічними та антропометричними показниками ($p > 0.05$) підтверджує гомогенність (порівнянність) груп. Це дозволяє припустити, що будь-які подальші відмінності у функціональних показниках будуть наслідком застосованого терапевтичного втручання, а не вихідних характеристик пацієнтів.

Клінічні характеристики травм: усі учасники дослідження зазнали тяжких ушкоджень кісток гомілки (переважно закриті або відкриті багатоуламкові переломи великогомілкової та малоомілкової кісток).

- Метод лікування: на основній стадії всі пацієнти проходили транзіозний остеосинтез за Ілізаровим або за допомогою сучасних стрижневих пристроїв зовнішньої фіксації.
- Тривалість іммобілізації: середній період перебування в пристрої становив від 4 до 8 місяців. Такий тривалий період фіксації гомілковостопного суглоба неминуче призвів до утворення фіброзних контрактур, атрофії м'язів нижньої частини ніг і стійкого порушення пропріоцептивного зв'язку з центральною нервовою системою.
- Стан на початку дослідження: дослідження розпочалося одразу після демонтажу АЗФ (на 2–5 дні). У всіх 10 пацієнтів спостерігалось помітне обмеження рухової амплітуди (ROM), больовий синдром під час

навантажень, порушення схеми кроку (кульгавість) та психологічний бар'єр для повної підтримки кінцівки (кінезіофобія).

Усі пацієнти були поділені на дві групи:

1. Контрольна група (КГ, n=5): отримала стандартну програму фізичної терапії, що включає фізичну терапію, класичний масаж і пасивну механотерапію.
2. Основна група (ОГ, n=5): навчалась за новою програмою, де 30-40% часу традиційного навчання замінювалося використанням технологій занурювальної віртуальної реальності (VR).

Критерії включення:

1. Завершена стадія консолидації перелому (рентгенографічно підтверджена).
2. Період після демонтажу АЗФ становить від 1 до 7 днів.
3. Наявність функціональних обмежень: контрактури гомілковостопного суглоба, порушення ходи, зниження сили м'язів гомілки.
4. Протипоказань до VR-терапії немає (епілепсія, тяжкі вестибулярні розлади).

Критерії виключення:

1. Супутні тяжкі захворювання, які унеможливають виконання фізичних вправ.
2. Наявність остеомієліту.
3. Атаксія.
4. Відсутність згоди на участь у дослідженні.

Організація та етапи дослідження:

Весь дослідницький процес був поділений на три послідовні етапи, що дозволило систематизувати збір даних і оцінити динаміку відновлення:

Етап I - Визначення (діагностичний): проводиться протягом перших 48–72 годин після демонтажу АЗФ. На цьому етапі проводилися початковий скринінг пацієнтів, збір антропометричних даних та проведення базового тестування (Візуально аналогова шкала (VAS), гоніометрія (ROM), 10-метровий тест ходьби (10MWT) і Встань та йди (TUG). Результати цього етапу слугували «відправною точкою» для оцінки початкового дефіциту функції.

Етап II - Формуючий (дослідний): тривалість етапу становила 2 тижні. У цей період була впроваджена програма фізичної терапії з використанням технологій віртуальної реальності. Пацієнти проходили щоденні сеанси, поєднуючи класичні методи (масаж, фізична терапія) та інноваційний блок віртуальної реальності. На цьому етапі проводився поточний моніторинг стану: корекція складностей VR-сценаріїв в залежності від адаптації пацієнта і контроль відсутності побічних ефектів (кінетоза)

Етап III - Контрольний (порівняльний): проводився наприкінці двотижневого курсу. Повторювався той самий діагностичний протокол, що й на першому етапі. Отримані дані були зафіксовані для подальшого статистичного аналізу, визначення надійності покращень і формулювання висновків щодо ефективності запропонованого методу

2.2. Методи оцінки функціонального стану пацієнтів

Для отримання об'єктивних даних про стан опорно-рухової системи та ефективність реабілітації було використано набір діагностичних методів, поділених на чотири блоки: оцінка болю, оцінка амплітуди рухів, оцінка мобільності та оцінка локомоторної функції.

1. Оцінка інтенсивності болю (Візуальна аналогова шкала - VAS): біль є основним обмежуючим фактором у ранній період після зняття АЗФ. Ми використовували 10-бальну шкалу, де:

- 0 балів - без болю;
- 1-3 балів - легкий біль;
- 4-6 балів - помірний біль (впливає на якість рухів);
- 7–10 балів - сильний і нестерпний біль.

Пацієнтів просили оцінити рівень болю двічі: у стані спокою та під час проведення функціонального тесту (спроба зробити повний крок із опорою на п'яту). Це дозволяло відрізнити механічний біль від нейрогенного страху перед навантаженням.

2. Гоніометрія - амплітуда рухів (ROM): для вимірювання рухливості гомілковостопного суглоба використовувався стандартний медичний гоніометр.

Щоб отримати повну картину контрактур і оцінити вплив тривалого носіння АЗФ на весь кінематичний ланцюг нижньої кінцівки, вимірювання проводилися у двох сегментах:

1. Колінний суглоб: незважаючи на те, що пристрій фіксував нижню частину ноги, колінний суглоб часто бере участь у патологічному процесі через примусове положення та обмеження навантаження.
 - Згинання: вимірялося у положенні пацієнта лежачи на животі з активним згинанням ноги. Оцінювали роботу м'язів задньої групи стегна і еластичність суглобової капсули.
 - Розгинання: було оцінено наявність дефіцитів розгинання (контрактур), що критично важливо для фази підтримки під час ходьби.
2. Гомілковостопний суглоб: ключовий сегмент, який зазнав найбільшої нерухомості. Ми вимірювали у трьох площинах для оцінки комплексної рухливості:
 - Дорсальне (тильне) згинання: оцінка здатності стопи підніматися, що необхідно для високоякісного «перекату» та кліренсу стопи на етапі переносу.

- Плантарне (підшовне) згинання: оцінка амплітуди, необхідної для фінального відштовхування стопи від поверхні.
- Інверсія (поворот всередину): вимірювання рухливості підтаранного суглоба. Обмеження інверсії часто пов'язують із жорсткістю зв'язок після тривалого фіксації спицями.
- Еверсія (поворот назовні): оцінка здатності стопи адаптуватися до нерівної місцевості.

Усі вимірювання фіксувалися в градусах. Порівняння проводилося зі стандартними параметрами та здоровою (контралатеральною) кінцівкою.

3. Тестування параметрів рухливості та ходьби

Для оцінки функціонального відновлення локомоторної функції (здатності рухатися незалежно) були використані міжнародно визнані динамічні тести:

1. Тест «Встань та йди» (TUG):

Тест Timed Up and Go (TUG) є «золотим стандартом» у реабілітації для оцінки рухливості, рівноваги та ризику падінь. Для пацієнтів після видалення зовнішнього фіксуючого пристрою (АЗФ) з гомілки та стопи цей тест є особливо інформативним, оскільки перевіряє не лише силу м'язів, а й функціональну готовність кінцівки до щоденних навантажень [47].

Нижче наведено рисунок 2.1 та детальну інструкцію з проведення та інтерпретації тесту.

Метод тестування: Тест оцінює час, протягом якого пацієнт виконує послідовність базових рухів.

Обладнання:

- Стандартне крісло з підлокітниками (висота сидіння приблизно 44-47 см).
- Секундомір.

- Мітка на підлозі (стрічка або конус) на відстані 3 метрів від передніх ніг крісла.

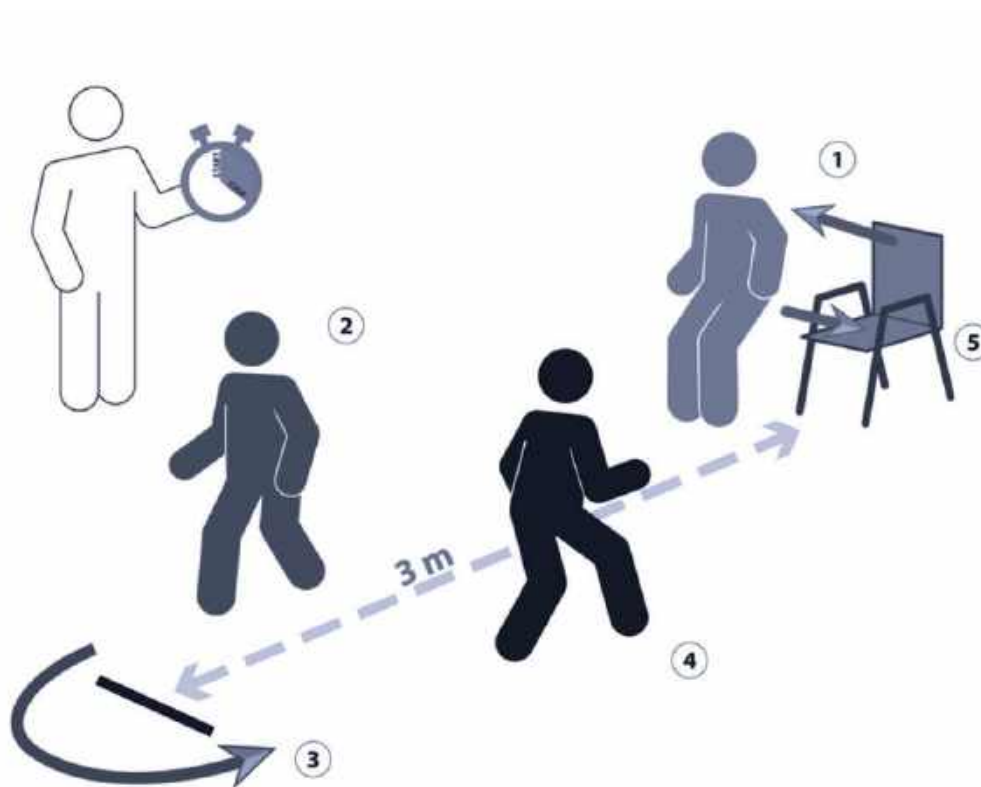


Рис.2.1 Візуаізація виконання тесту “Встань та йди”

Інструкції для пацієнта:

1. Пацієнт сидить, щільно притиснувши спину до спинки крісла, руки лежать на підлокітниках. Якщо пацієнт використовує тростину або милиці (що можливо після зняття АЗФ), він може їх використовувати.
2. За командою «Марш!» пацієнт встає, проходить 3 метри до позначки у звичайному і безпечному темпі, розвертається, повертається до крісла і знову сідає.
3. Час фіксується командою «Марш» і зупиняється, коли сідниці пацієнта торкаються сидіння.

Важливо: Перед спробою тесту рекомендується дати пацієнту одну спробу випробування, щоб ознайомитися з траєкторією.

Критерії та інтерпретація результатів:

Для пацієнтів після травм гомілки та стопи результати можуть варіюватися залежно від етапу реабілітації. Інтерпретація результатів наведено в таблиці 2.1

Таблиця 2.1 - Оцінювання тесту “Встань та йди”

Час (сек)	Рівень мобільності	Ризик падіння
< 10	Вільна мобільність (нормальна)	Низький
11 - 20	У межах норми для літніх людей або тих, хто отримав травми	Низький/середній
21 - 30	Потрібна зовнішня допомога або додаткові засоби підтримки	Високий
> 30	Тяжке порушення мобільності	Дуже високий

Особливості для пацієнтів після видалення АЗФ:

- Порівняння з часом: Найважливіше - не абсолютна цифра, а прогрес. Покращення результату на 2 секунди або більше вважається клінічно значущим покращенням.
- Якість руху: Звертаємо увагу на симетрію кроку, впевненість при повороті та використання рук при стоянні. Поворот - найскладніший етап для пацієнтів із травмованою щиколоткою.

Практичні поради:

- Взуття: Пацієнт повинен носити те взуття, яке він зазвичай носить після зняття пристрою (не капці чи босоніж).
- Безпека: При першій спробі після видалення АЗФ завжди страхуємо пацієнта з боку травмованої ноги.

- Біль: Якщо пацієнт помітив посилення болю в гомілковостопі під час тесту, фіксуємо це. Часто час збільшується не через слабкість м'язів, а через біль у зоні консоїдації перелому.

2. Тест на ходьбу на 10 метрів (10MWT):

Тест ходьби на 10 метрів (10MWT) - це базовий інструмент для оцінки швидкості ходьби, який є життєво важливим показником у реабілітації [48].

Для пацієнтів після переломів гомілки та стопи (після видалення апарату Ілізарова або інших АЗФ) цей тест є критично важливим для оцінки відновлення нормального патерну кроку та здатності рухатися в міських умовах (наприклад, мати час перейти дорогу на світлофорі).

Нижче наведено рисунок 2.2 та детальну інструкцію з проведення та інтерпретації тесту.

Метод тестування: Тест вимірює час, необхідний для проходження 10 метрів, але з урахуванням фаз прискорення та уповільнення.

Обладнання:

- Пряма лінія довжиною 14 метрів.
- Позначки: відмітки на 0 м, 2 м, 12 м і 14 м.
- Секундомір.

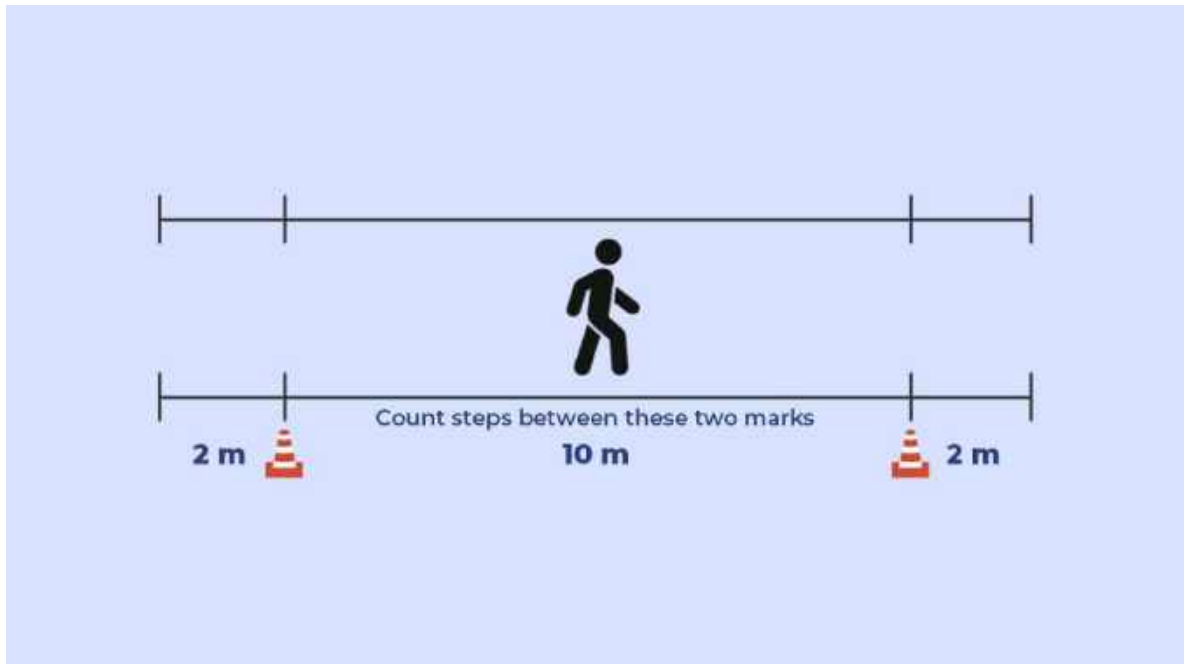


Рис.2.2 Візуаізація виконання тесту “10 метрового тесту ходьби”

Інструкція:

1. Маркування: Час фіксується лише на центральному 10-метровому сегменті (між позначками 2 м і 12 м). Перші та останні 2 метри потрібні пацієнту для того, щоб почати і завершити рух у природному темпі, без ривка на початку та різкого гальмування. В протоколі фіксуємо використання допоміжних засобів, якщо пацієнт використовує їх.
2. Два режими: Тест зазвичай проводиться двічі:
 - *Комфортна швидкість*: «Ідіть у звичному темпі комфортному для вас темпі».
 - *Максимальна швидкість*: «Ідіть так швидко, як можете, але щоб це було безпечно для вас».
3. Повтори: У кожному режимі проводяться 3 вимірювання, після чого обчислюється середнє арифметичне значення.

Розрахунок:

Швидкість (V) обчислюється за формулою: $V = S/t$, м/с.

Інтерпретація результатів:

Для пацієнтів після травм нижніх кінцівок швидкість ходьби безпосередньо пов'язана з функціональною незалежністю, інтерпретацію результатів наведено в таблиці 2.2

Таблиця 2.2 - Оцінювання 10 метрового тесту ходьби

Швидкість (м/с)	Функціональний стан
< 0,4	Переміщення тільки всередині приміщення
0.4 - 0.8	Обмежене переміщення на вулиці
> 0,8	Повноцінне переміщення вулицею
1.2 - 1.4	Норма для здорових дорослих (перехід дороги на світлофорі)

Клінічно значущі зміни:

Для ортопедичних пацієнтів значним покращенням вважається збільшення швидкості на 0,1–0,15 м/с. Якщо після курсу реабілітації пацієнт став ходити швидше на цю дистанцію, значить терапія ефективна.

Особливості для пацієнтів після видалення АЗФ:

Після тривалої фіксації нижньої частини ноги апаратом часто виникає «анталгічна хода» і страх опори. Під час проведення 10 MVT звертаємо увагу на:

1. Довжина кроку: Часто крок травмованої ноги коротший через тугу рухливість гомілкостопа.
2. Каденція (частота кроків): Пацієнти можуть робити маленькі кроки замість повного перекату стопою.
3. Асиметричний перекач: Після переломів стопи часто немає фази відштовхування пальцями.

4. Антропометричні методи та первинний скринінг:

Для забезпечення наукової надійності та підтвердження однорідності вибірки ($n=10$) були зафіксовані базові антропометричні показники: вік (роки), зріст (см) та маса тіла (кг). Ці параметри використовувалися для підтвердження порівнянності фізичного стану учасників дослідження, що виключає вплив значущих відмінностей у фізичному розвитку на кінцеві результати реабілітації.

2.3. Методи математичної та статистичної обробки результатів

Для забезпечення об'єктивності, надійності та наукової достовірності отриманих даних під час дослідження було використано набір методів математичної статистики. Результати оброблялися за допомогою програм Statistics 14.0.0.15 та Microsoft Excel 2021.

Вибір статистичних інструментів визначався розміром вибірки ($n=10$) та характером розподілу даних, що дозволяло як описовий аналіз, так і тестувати гіпотези щодо значущості відмінностей до і після реабілітації.

1. Описова статистика (Descriptive Statistics)

Для первинної обробки кількісних даних (антропометрія, гоніометрія, результати тестів) використовувалися наступні параметри:

1. Арифметичне середнє (M): використовується як основний показник центральної тенденції для симетрично розподілених даних (наприклад, зріст і вага).
2. Стандартне відхилення (SD): використовується для оцінки ступеня відхилення даних відносно середнього, що дозволяло судити про однорідність груп пацієнтів.
3. Медіана (Me): як більш стабільний показник центральної тенденції, вона використовувалась в аналізі суб'єктивних показників.

4. Квартилі (Q1 і Q3): використовуються для опису міжквартильного діапазону (IQR), що дозволяло візуалізувати розподіл результатів у групі без урахування нормальності розподілу.
5. Частотний аналіз і відсотки: використовується для якісної характеристики групи (наприклад, розподіл пацієнтів за типом травми або місцем перелому).

2. Порівняльна статистика (Inferential Statistics)

Для перевірки гіпотези про ефективність розробленої програми (порівняння даних до і після курсу VR-терапії) використовувалися такі критерії:

1. Непараметричні критерії (застосовувались обов'язково через малий розмір вибірки $n=10$):

Критерій Вілкоксона (Wilcoxon Signed-Rank Test): використовувався як основний метод оцінки валідності зсуву у показниках до і після лікування, оскільки цей тест найбільш чутливий до змін у малих вибірках з аномальним розподілом.

Критерій Манна-Уїтні: використовується для міжгрупового порівняння.

3. Інтерпретація результатів

Достовірність відмінностей у дослідженні приймалися на рівні значущості $p < 0,05$ (ймовірність 95%), що є загальноприйнятим стандартом у біомедичних дослідженнях. Значення $p < 0,01$ вважалися високим ступенем надійності отриманих результатів.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ПРОГРАМИ ФІЗИЧНОЇ ТЕРАПІЇ ЗА ДОПОМОГОЮ VR

3.1 Характеристики апаратного та програмного комплексу віртуальної реальності.

Для проведення основної частини реабілітаційної діяльності використовувалася занурююча система віртуальної реальності, що працює за принципом активного біозворотного зв'язку (БОС). Програмно-апаратний комплекс включав три ключові компоненти:

1. Система візуалізації та позиціонування (Hardware): в якості базового пристрою використовувалася автономний шолом віртуальної реальності (HMD - Head-Mount Display) з шістьма ступенями свободи (6 DOF — Six Degrees of Freedom). Це критично важлива характеристика, яка дозволяє системі відстежувати не лише повороти голови пацієнта, а й будь-які його рухи в просторі (вперед-назад, вправо-ліво, вгору-вниз).

Дисплеї з високою щільністю пікселів і частотою оновлення не менше 90 Гц мінімізували ризик «кінетозу» (віртуального укачування), що дозволяло проводити тренування до 20-30 хвилин без дискомфорту для пацієнтів.

Просторова звукова система використовувалася для передачі аудіосигналів, коли нога правильно контактувала з віртуальною поверхнею, створюючи мультисенсорне занурення.

2. Інтегрована система відстеження нижніх кінцівок: для синхронізації реальних рухів пацієнта з його віртуальним аватаром використовувалася технологія Inside-out tracking (відстеження зсередини на зовні) у поєднанні з інерційними вимірювальними блоками (IMU-сенсорами).

Сенсори, прикріплені до дистальної третини нижньої частини ноги пацієнта, фіксували кути нахилу та прискорення кінцівки. Це дозволяло системі відтворювати віртуальні ноги пацієнта в реальному часі, забезпечуючи пропріоцептивне обманування (мозок сприймав віртуальні ноги як свої). Точність відстеження дозволяла фіксувати навіть найменші амплітуди в гомілковостопному суглобі, які невидимі під час звичайного візуального спостереження.

3. Програмне середовище та сценарії реабілітації (Software): програмне забезпечення було інтерактивним середовищем, спеціально адаптованим для ортопедичних пацієнтів. Ключові технологічні особливості програмного забезпечення:

- Гейміфікація процесу: вправи презентувалися у вигляді ігрових завдань (наприклад, ходьба віртуальним парком, клацання по підсвічених плитках, уникнення перешкод). Це стимулювало вивільнення дофаміну, підвищувало мотивацію пацієнтів і знижувало поріг чутливості до болю.
- Модуль покращення зору: система навмисно могла трохи збільшувати амплітуду віртуального руху порівняно з реальною. Це дозволяло пацієнту бачити «успіх» (повний переكات стопи), навіть якщо фізично він все ще обмежено контрактурою. Ця технологія направлена на подолання кінезіофобії (страх руху)
- Система БОС (Biofeedback): коли стопа була розташована неправильно (наприклад, на зовнішньому ребрі або без переكات п'ятою), віртуальне середовище видавало візуальний сигнал (червоне світіння) або звукове попередження, змушуючи пацієнта миттєво коригувати рух.

4. Принципи сенсорної інтеграції та мультимодальної стимуляції: програмне середовище комплексу було розроблене з урахуванням поняття «занурена присутність» (Presence). На відміну від традиційних програм біозворотного зв'язку на екрані монітора, занурююче VR-середовище виключало зовнішні

відволікаючи стимули, спрямовуючи 100% когнітивних ресурсів пацієнта на відновлення ходьби.

- Візуально-пропріоцептивний конфлікт: програмне забезпечення дозволяло маніпулювати візуальним зворотним зв'язком. У випадках вираженого страху навантаження (кінезіофобії) система транслувала «ідеалізовану модель» руху аватара. Це активувало премоторну кору через систему дзеркальних нейронів, готуючи нейронні мережі до реального виконання складного руху.
- Тактильно-візуальна синхронізація: затримка (Latency) між реальним рухом стопи та її відображенням у шоломі становила менше 20 мс. Така висока швидкість синхронізації критично важлива для того, щоб мозок розпізнавав віртуальну кінцівку як «свою» (ефект протезного втілення), що суттєво прискорює нейропластичні зміни соматосенсорної кори.

5. Алгоритми адаптивного навантаження та гейміфікації: програмне забезпечення має алгоритми автоматичної адаптації складності залежно від поточної продуктивності пацієнта:

- Динамічне коригування цілі: якщо датчики фіксували збільшення амплітуди тильного згинання на 2° – 3° , система автоматично пропонувала вищі віртуальні перешкоди, утримуючи пацієнта у стані «оптимального виклику» (зоні ближайшого розвитку).
- Когнітивне навантаження (Dual-tasking - Подвійне виконання завдань): на пізніших етапах реабілітації когнітивні завдання (наприклад, вибір шляху або підрахунок об'єктів під час ходьби) були включені до сценарію. Це імітувало реальні умови життя, де ходьба є автоматизованим фоновим процесом, і змушувало центральні генератори патерну (CPG) працювати без постійного свідомого нагляду.

6. Безпека та ергономіка інтерфейсу: враховуючи особливості пацієнтів після АЗФ (дисбалансу), комплекс включав систему віртуальних «безпечних меж». Коли пацієнт наближався до краю реальної тренувальної зони, у віртуальному просторі з'являлася бар'єрна сітка, яка запобігала зіткненням і падінням, забезпечуючи психологічний комфорт під час вправ.

7. Інтерфейс керування для спеціаліста: комплекс контролювався через планшет/монітор реабілітаційного терапевта, який відображав реальні кути згинання суглобів у градусах. Це дозволяло змінювати складність вправ, висоту віртуальних перешкод і чутливість сенсорів під час сесії залежно від поточного прогресу пацієнта.

3.2. Програма фізичної терапії із використанням іммерсивних технологій

Програма фізичної терапії була розроблена з урахуванням особливостей відновлення після тривалої іммобілізації у зовнішніх фіксуєючих пристроях (АЗФ). Ключовою особливістю цієї методики є інтеграція принципу нейропластичності та біологічно зворотнього зв'язку через VR-інтерфейс.

Реабілітаційний курс був розрахований на 2 тижні (12 занять). Розклад занять: 6 разів на тиждень (понеділок-субота). Тривалість кожного сеансу становить 50 хвилин.

Загальна структура терапевтичного заняття:

1. Вступний та підготовчий блок (10 хв): підготовка периферичного рецепторного апарату.
2. Основний блок (25-30 хв): інтенсивне VR-тренування з прогресивною складністю.
3. Фінальний блок інтеграції (10 хв): передача нейронних зв'язків, сформованих у VR, на реальне переміщення.

Детальний зміст I етапу (1-й тиждень: Адаптаційно-сенсорний період)

Головне завдання першого тижня — подолати сенсорний голод і пригнічити кінезіофобію (страх руху та болю). Через тривалу фіксацію в АЗФ у пацієнтів сформувалася патологічна позиція «бережіння» ноги.

Вправа 1: «Віртуальне втілення та сенсорне калібрування»

Механіка: пацієнт сидить або стоїть із підтримкою. У VR-гарнітурі він бачить свої віртуальні ноги (аватар), які повністю синхронізовані з його рухами.

Дія: виконуються повільні рухи стопи (згинання/розгинання).

Терапевтичний ефект: завдяки високій точності відстеження (затримка менше 20 мс) мозок починає «приймати» віртуальну кінцівку. Візуальне підтвердження руху, яке насправді може супроводжуватися болем, у VR сприймається як «безпечне», що знижує поріг болю.

Вправа 2: «Динамічний розподіл осьового навантаження»

Механіка: пацієнт стоїть перед віртуальним дзеркалом. Під кожною ногою у VR відображається цифрова платформа або індикатор тиску.

Завдання: перенесіть вагу тіла з однієї ноги на іншу, щоб індикатори під обома ногами набули однакового кольору.

Терапевтичний ефект: відновлення опорної симетрії. Після АЗФ пацієнти несвідомо передають до 70-80% ваги здоровій нозі. Візуальний біозворотний зв'язок змушує пацієнта довіряти травмованій кінцівці, покладаючись на об'єктивні дані системи, а не на фальшивий біль.

Вправа 3: «Акцентований переكات»

Механіка: імітація кроку на місці. Пацієнт має торкнутися віртуальної поверхні саме «п'ятою» свого аватара.

Завдання: коли п'ята правильно торкається, у VR лунає певний звуковий сигнал і з'являється візуальний спалах.

Терапевтичний ефект: формування першої фази кроку, яка зазвичай втрачається після травми (пацієнти часто ставлять стопу плоско або на носок, уникаючи удару п'ятою).

Детальний зміст II етапу (2-й тиждень: функціонально-локомоторний період)

На другому тижні увага зміщується з простої активації пропріоцепції на відновлення складної координації та витривалості. Головне завдання - зруйнувати патологічний стереотип ходьби («кульгавість») і відновити впевненість пацієнта під час руху в змінному середовищі.

Вправа 4: «Подолання віртуальних перешкод»

Механіка: пацієнт рухається прямою віртуальною стежкою, на якій з'являються перешкоди різної висоти та ширини (пороги, гілки, маленькі калюжі).

Завдання: зробити крок достатньої висоти та довжини, щоб «переступити» через об'єкт. Якщо пацієнт торкається предмета віртуальною ногою, шолом подає сигнал вібрації або екран на короткий час фарбується в червоний.

Терапевтичний ефект: відпрацювання фази переносу стопи. Пацієнт вимушен збільшити кут дорсифлексії (тильного згинання) в гомілковостопному суглобі, долаючи залишкову контрактуру. Гейміфікація відволікає від болю, дозволяючи досягти більшої амплітуди, ніж при традиційній фізичній терапії.

Вправа 5: «Сценарій ходьби різними поверхнями»

Механіка: віртуальне середовище змінює візуальне покриття (пісок, трава, асфальт, плитка).

Завдання: підтримувати стабільний темп ходьби, змінюючи візуальний ландшафт. Під час ходьби по «піску» анімація аватара сповільнюється, що вимагає більш потужного відштовхування від пацієнта.

Терапевтичний ефект: тренування ресорної функції стопи. Пацієнт вчиться адаптувати м'язові зусилля гомілки до різних умов, що є критично важливим для повернення до повноцінного повсякденного життя.

Вправа 6: «Когнітивна локомоція»

Механіка: це найскладніший рівень. Під час ходьби у VR пацієнту пропонують інтерактивні завдання: наприклад, вибрати і «ступити» лише по плитках певного кольору або класифікувати об'єкти, що з'являються з боків.

Завдання: підтримувати баланс і правильний ритм кроку, одночасно розв'язуючи ментальне завдання.

Терапевтичний ефект: перенести навички ходьби на рівень підсвідомого автоматизму. У реальному житті ми не думаємо про те, як поставити стопу; ми думаємо про маршрут або розмову. Ця вправа «розвантажує» контроль ходи від кори до підкоркових структур (базаальних гангліїв), що є фінальним етапом якісної реабілітації.

Фінальний блок інтеграції (щодня наприкінці уроку)

Після зняття VR-гарнітури надзвичайно важливо «заземлити» отриманий досвід.

1. Сенсорний перенос: протягом 5 хвилин пацієнт проходить справжнім коридором. Терапевт дає команду: *"Згадайте відчуття перекату із віртуального лісу."*
2. Пропріоцептивна корекція: використання балансуючих подушечок (простих, не віртуальних). Пацієнт повинен утримувати рівновагу на нестабільній поверхні, використовуючи стабілізуючі м'язи, активовані VR.

3. Домашнє завдання: навчити правильному положенню стопи під час підйому і спуску сходами (використовуючи «ступінчастий» алгоритм, відпрацьований у VR-сценарії з перешкодами).

3.3. Організація контролю безпеки та критерії дозування фізичної активності у реабілітації через VR

Використання інноваційних технологій віртуальної реальності вимагає суворого дотримання протоколів безпеки та індивідуального вибору інтенсивності тренувань. Враховуючи особливості пацієнтів після демонтажу зовнішніх фіксуючих пристроїв (АЗФ), система контролю була поділена на три рівні: фізіологічний, біомеханічний та психоемоційний.

1. Критерії дозування фізичного та когнітивного навантаження. На відміну від традиційних терапевтичних вправ, навантаження у VR-середовищі є мультимодальним (як фізичним, так і візуально-когнітивним). Щоб запобігти втомі, ми використали принцип прогресуючого ускладнення, поділений за такими параметрами:

- Параметр часу: тривалість першого заняття у VR не перевищувала 10–12 хвилин (період адаптації вестибулярної системи). До кінця другого тижня час безперервного перебування у віртуальному середовищі збільшився до 25–30 хвилин.
- Інтенсивність стимуляції: на початкових етапах використовувалися статичні віртуальні сцени з мінімальною кількістю рухомих об'єктів. По мірі адаптації пацієнта вводилися динамічні сценарії (рух перешкод, зміни освітлення, аудіовізуальні ефекти).
- Складність моторних завдань: параметри «віртуального супротиву» та висота перешкод коригувалися спеціалістом на основі даних гоніометрії. Навантаження вважалося достатнім, якщо пацієнт міг виконати 80% завдань сценарію без сильного болю.

2. Запобігання побічним ефектам занурення (кінетозу). Одним із ключових завдань при використанні VR-шоломів є мінімізація ризику «укачування». З цією метою в нашому дослідженні дотримувалися такі технічні норми:

- Частота оновлення: використання обладнання з мінімальною частотою 90-120 Гц, щоб усунути візуальне мерехтіння.
- Калібрування міжзіницікової відстані (IPD): індивідуальне налаштування лінз шолома для кожного пацієнта, запобігання напруженню м'язів очей та головному болю.
- Стабільний горизонт: у сценаріях завжди існувала стабільна точка опори (віртуальна підлога або статичні об'єкти вдалині), що допомагало вестибулярному апарату пацієнта співвідносити віртуальний рух із реальним положенням тіла.

3. Клінічний моніторинг та заходи безпеки. Процес реабілітації супроводжувався постійним моніторингом стану пацієнта:

- Контроль болю: фізичні вправи негайно припинялися або коригувалися, якщо рівень болю VAS перевищував 5.
- Захисний режим: пацієнт виконував вправи у VR-шоломі в зоні, обладнаній поручнями або страхувальними брусами. Фізіотерапевт завжди був поруч, щоб запобігти втраті рівноваги, спричиненій «ефектом занурення».
- Гігієнічні стандарти: враховуючи наявність точок входу спиць після АЗФ (навіть якщо вони загоїлися), використовувалися одноразові накладки шоломів і регулярне антисептичне оброблення контролерів і датчиків.

4. Психологічна адаптація та мотиваційний контроль. Оскільки тривала нерухомість часто призводить до депресивних станів і зниження мотивації, у програмі використовувалися елементи позитивного підкріплення.

- Миттєвий зворотний зв'язок: коли було досягнуто куту згинання цілі або відстань проходила без помилок, система видавала заохочувальні сигнали (візуальні бонуси, звукові ефекти).
- Аналіз «успіху»: наприкінці кожного заняття пацієнту показували графік прогресу, що створювало психологічне ставлення до відновлення та підвищену дотримання двотижневого курсу лікування.

3.4 Базова програма фізичної терапії (спільна для обох груп)

Хоча основна група використовувала іммерсивні технології, обидві групи (основна та контрольна групи) щодня проводили регульований комплекс базової фізичної терапії. Ця програма була спрямована на підготовку опорно-рухової системи до навантажень і відновлення трофіки тканин після демонтажу апарату зовнішньої фіксації (АЗФ).

Базова програма включала такі компоненти:

1. Терапевтичні вправи (фізична терапія):

Цей блок є основою моторної реабілітації. Головне завдання на цьому етапі - підготувати суглоби та м'язи до більш складної координаційної роботи у віртуальній реальності.

А. Ізометричні вправи (статичні):

Механіка: Пацієнт виконує вольове натягування м'язів без зміни довжини і без руху в суглобі.

Базові вправи:

- «Тиск у коліні»: пацієнт у положенні лежачи намагається максимально притиснути підколінну ямку до поверхні дивана, напружуючи квадрицепсовий м'яз стегна.

- «Напруження гомілки»: статичне напруження литкових і камбалоподібних м'язів.

Дозування: Натяг утримується 5-7 секунд, після чого повністю відпочивається 10 секунд. Виконується 10-15 повторень.

Мета: Запобігти атрофії м'язів, яка є неминучою після фіксації в АЗФ, і створити «м'язовий корсет» для суглоба.

Б. Активно-пасивна мобілізацій:

Механіка: Рухи виконується пацієнтом незалежно, але в умовах, які мінімізують вплив гравітації та тертя.

Базові вправи:

- «Ковзання п'ятою»: пацієнт, лежачи на спині, згинає ногу в коліні, не піднімаючи п'яту з дивана (для зменшення тертя використовувалися спеціальні ковзаючі панелі).
- «Педаль»: У сидячому положенні пацієнт виконує дорсифлексію та підшоввне згинання стопи, намагаючись досягти максимальної амплітуди.

Мета: Ці вправи безпосередньо впливають на гоніометричні показники, поступово розтягуючи зв'язковий апарат і покращуючи вироблення синовіальної рідини.

В. Вправи з легким опором (еластичні стрічки):

Механіка: До середини курсу (ближче до другого тижня) додаються вправи за допомогою еластичних стрічок (терабанда) мінімальної жорсткості.

Дія: Пацієнт виконує дорсифлексію стопи або розгинання коліна, долаючи опір стрічки.

Мета: Збільшення сили м'язів.

Г. Стрейчінг (розтяг):

Механіка: Повільне розтягування м'язів задньої частини стегна та гомілки.

Техніка: Плавний натяг, поки не з'явиться легкий дискомфорт, утримуючи положення 20-30 секунд.

Мета: Усунення м'язових контрактур, спричинених примусовим положенням ноги в апараті.

Цей блок забезпечує «механічну» готовність ноги. Як тільки пацієнт опановував ці рухи в реальній кімнаті, ми переходили до автоматизації їх у VR-сценаріях (для основної групи).

2. Методи ручного впливу та десмургії:

Цей блок спрямований на зовнішню стимуляцію тканин і корекцію фізичного стану кінцівки руками терапевта. Ручна дія готує сенсорні системи пацієнта, що особливо важливо для подальшої роботи з пропріоцепцією у VR-шоломі.

А. Терапевтичний масаж:

Техніка: Масаж виконується класичною технікою, починаючи від дистальних частин (стопи) до проксимальної (стегна, лімфатичні вузли).

Дія:

- *Погладжування та тертя:* стимулює венозний і лімфатичний дренаж, що критично важливо для зняття набряку, що зберігається після видалення пристрою.
- *Розминання:* спрямоване на глибокі м'язові групи для підвищення їхньої еластичності та трофіки, що покращує м'язову реакцію.

Мета: Зменшення дискомфорту в м'язах і підготовка рецепторного апарату до активних рухів.

Б. Мобілізація м'яких тканин та робота з рубцями:

Специфічність: У пацієнтів після АЗФ спостерігаються специфічні зміни тканин у місцях входження спиць і стрижнів.

Техніка: Терапевт проводить м'які зміщення шкіри та підшкірно-жирової клітковини навколо загоєних отворів від спиць.

Мета: Запобігання утворенню глибоких спайок між шкірою та м'язовою фасцією, що може обмежувати ковзання м'язів і заважати повному згинанню коліна і стопи приводячи до контрактур.

В. Пасивна розробка суглобів (мобілізація):

Механіка: Виконання рухів у суглобі руками терапевта без активної участі м'язів пацієнта.

Дія: Плавні гойдальні рухи в межах доступної амплітуди без болю. Особлива увага приділяється мобілізації надколінника (колінної чашечки) та гомілковостопному суглобу рухливість яких часто обмежена після тривалої фіксації.

Значення: Це «розігріває» суглоб, збільшуючи секрецію синовіальної рідини та зменшуючи опір тканин перед активною фазою тренування.

Цей блок дозволяє зняти «фізичний блок» і страх болю до того, як пацієнт почне самостійно навантажувати ногу.

3. Підготовка до вертикалізації та ходьби

Цей блок є зв'язком між вправами на кушетці та повноцінним переміщенням. Тут акцент зміщується з ізольованої роботи м'язів на їхню функціональну взаємодію у стоячому положенні.

А. Вправи у замкненому кінетичному ланцюгу:

Механіка: Виконання рухів, при яких стопа має фіксовану опору. Це найфізіологічніший спосіб відновлення сили, оскільки він імітує навантаження ходьби.

Техніка:

- *Міні-присідання*: плавне згинання колінних суглобів під кутом не більше 30-45° з обов'язковою підтримкою рук на брусах або поручнях.
- *Переكاتи*: Переміщення ваги тіла з п'яти на носок і назад, стоячи між паралельними брусами.

Мета: Тренування м'язів гомілки і стегон втримувати вагу тіла та контролювати стабільність суглобів.

Б. Тренування пропріоцепції (не VR):

Механіка: Розвиток відчуття положення тіла в просторі без використання візуальних стимуляторів шолома.

Техніка:

- Втримування рівноваги в основній стійці (ноги на ширині плечей) з поступовим зменшенням площі опори.
- Вправи в статиці: Збереження нерухомості із закритими очима, що змушує мозок активніше зчитувати сигнали від рецепторів суглобів і зв'язок, які нещодавно вивільнилися з АЗФ.

Мета: Це основа безпеки. Перед тим, як занурити пацієнта у віртуальний світ, необхідно переконатися, що його вестибулярний апарат і стабілізуючі м'язи готові до вертикальних навантажень у реальності.

С. Корекція крокового патерну (до пересування):

Механіка: Практика окремих фаз кроку на рівній поверхні.

Дія:

- Основний акцент на «перенесення» п'яти вперед і м'яке розташування стопи на опорі.
- Контроль повного розгинання коліна у фазі опори.

Мета: Позбутися звички «щадної» ходи (кульгавості), яка сформувалася протягом місяців носіння пристрою.

Цей етап готує пацієнта до переходу до основного блоку заняття, де всі ці навички (сила, амплітуда та крок) будуть комбіновані та треновані у VR-ігрових сценаріях за допомогою біофідбеку.

4. Режим дозування:

Тривалість: Базова частина займала 20-25 хвилин у структурі кожного уроку.

Критерії: Навантаження обмежувалося початком помірною болі (не вище 4 балів за шкалою VAS).

Таким чином, базова програма забезпечувала механічне відновлення тканин і суглобів. У контрольній групі ця програма була основним інструментом реабілітації протягом усього заняття. У основній групі базова програма слугувала обов'язковим підготовчим етапом, після чого пацієнти переходили до інтенсивного VR-тренінгу для закріплення навичок на рівні нейропластичності мозку.

Цей розподіл дозволив нам у основній групі досягти кращих показників мобільності (гоніометрія) з порівнянними показниками сили (ММТ).

РОЗДІЛ 4 ПОРІВНЯННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ «ДО» І «ПІСЛЯ» ФІЗИЧНОЇ ТЕРАПІЇ

4.1 Аналіз динаміки показників амплітуди рухів і сили м'язів під впливом запропонованої програми. (Порівняння результатів «до» і «після» для ROM і ММТ).

В обох групах контрольній та основній, для оцінки ефективності запропонованої програми фізичної терапії було проведено порівняльний аналіз діапазону рухів у колінному та гомілковостопному суглобах, до та після 2 тижнів реабілітації. Результати представлені у форматі Me(Q1;Q3) та наведені в таблиці 4.1 Також для більш візуальної оцінки ефективності прикладних програм було розраховано Δ середнє зростання показників ступенів для кожної групи, що наведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.1 - Динаміка параметрів гоніометрії дослідницьких груп, Me(Q1;Q3)

Гоніометрія					
	Основна		Контрольна		
	до	після	до	після	
Колінний суглоб згинання °	115,6(115;120)	129,8(129;130)	115(105;125)	122(110;130)	
Колінний суглоб розгинання °	4,4(2;7)	1(0;0)	4,8(3;6)	0(0;0)	
Гомілковостопний суглоб тильне згинання °	11,8(9;15)	23(22;25)	9,2(8;10)	18(17;19)	
Гомілковостопний суглоб підшовене згинання °	27,4(26;29)	36,8(38;40)	25(22;28)	35(32;38)	
Гомілковостопний суглоб інверсія всередину °	13,6(13;15)	26,8(26;29)	15,2(15;18)	25(24;28)	
Гомілковостопний суглоб еверсія назовні °	7,2(6;8)	16,4(16;17)	7,8(7;9)	15,4(16;17)	

Під час початкового огляду обидві групи показали обмеження амплітуди згинання та наявність дефіциту розгинання (контрактури) та є статистично співставними $p > 0,05$. У основній групі медіанна згинання становила $115,6^\circ$. Після двотижневого курсу реабілітації цей показник зріс до $129,8^\circ$, що свідчить про збільшення на $14,2^\circ$. У контрольній групі збільшення було менш вираженим - медіана зросла з 115° до 122° (різниця 7°). У основній групі відновлення згинання після курсу реабілітації було вдвічі інтенсивнішим ($14,2^\circ$ проти $7,0^\circ$) проте, при порівнянні результатів обох груп наприкінці курсу фізичної терапії не було встановлено статистично значущої різниці ($p > 0,05$).

Щодо динаміки розгинання в колінному суглобі, на момент завершення дослідження обидві групи досягли повного усунення дефіциту розгинання. Показник медіани становив у основній групі $1(0;0)^\circ$ і контрольній становив $0(0;0)^\circ$. Порівняльний аналіз між групами на цьому етапі не показав статистично значущої різниці ($p > 0,05$), що свідчить про порівнянну ефективність обох методів (стандартна фізична терапія та її комбінація з VR) у контексті зменшення контрактур розгинання в коліні.

Наступним етапом дослідження був порівняльний аналіз амплітуди руху в гомілковостопному суглобі у сагітальній площині, включаючи оцінку дорсального та плантарного згинання. При оцінюванні результатів об'єму рухів в гомілковостопному суглобі на початку дослідження показало однорідність груп порівняння ($p > 0,05$). Після проведення курсу фізичної терапії у пацієнтів основної групи, програма якої була доповнена VR-технологіями, медіана тильного згинання сягнула з $11,8^\circ$ до 23° , що майже відповідає функціональній нормі. В контрольній групі даний показник виріс з $9,2^\circ$ до 18° . Порівняльний міжгруповий аналіз після терапії виявив статистично значущу користь основної групи ($p < 0,05$), що може бути зумовлено специфікою заняття з VR-технологіями,

спрямованих на біозворотний зв'язок і цілеспрямоване виконання рухів у певному діапазоні.

Динаміка плантарного згинання також продемонструвала переваги комбінованого підходу: у основній групі медіана зросла з $27,4^\circ$ до $36,8^\circ$, а в контрольній групі - з 25° до 35° . Незважаючи на позитивну тенденцію в обох групах, за допомогою технологій віртуальної реальності спостерігалися вищі та більш кращі результати, але при порівнянні обох груп після реабілітації не було виявлено статистично значущих відмінностей ($p > 0,05$). Виходячи з цього, аналіз амплітуди руху в сагітальній площині дає нам можливість стверджувати, що ефективність включення VR-технологій у процес реабілітації, забезпечує більш виражене відновлення як дорсальної, так і підшвальної згинання гомілковостопного суглоба порівняно зі стандартним протоколом.

Останнім етапом оцінки гоніометричних даних був аналіз амплітуди рухів гомілковостопного суглоба у фронтальній площині (інверсія та еверсія). Ці показники дозволяють оцінити відновлення функцій стопи. Під час первинного обстеження гоніометрії ($p > 0,05$) статистично значущих відмінностей між групами не спостерігалось. Медіанна інверсія в основній групі становила $13,6^\circ$, а в контрольній групі - $15,2^\circ$. Щодо параметра еверсії, показники також були порівнянними: $7,2^\circ$ у основній групі проти $7,8^\circ$ у контрольній групі. Отримані результати вказують на початкове симетричне обмеження рухливості стопи у фронтальній площині у пацієнтів обох вибірок.

На момент фінального огляду обидві групи показали виражену позитивну тенденцію, але результати у групі віртуальної реальності (VR) перевищили показники стандартної терапії. У дослідженій групі медіанна інверсія зросла до $26,8^\circ$, тоді як у контрольній групі ця цифра становила 25° . Порівняльний аналіз виявив перевагу основної групи ($p < 0,05$), яку можна пояснити залученням механізмів нейропластичності та покращеною пропріоцепцією при використанні іммерсивних VR-симуляторів.

Подібна тенденція спостерігалася після завершення курсу та під час відновлення еверсії стопи. У основній групі після курсу фізичної терапії медіана досягла $16,4^\circ$ майже досягнувши фізіологічної норми. У контрольній групі медіана становила $15,4^\circ$. Незважаючи на близькість абсолютних значень, порівняльний аналіз показав статистично значущу перевагу основної групи ($p < 0,05$) на фінальному етапі загальна динаміка зростання в групі була кращою завдяки підтримці VR.

Таким чином, використання технологій віртуальної реальності у процесі реабілітації сприяє більш ефективному та передбачуваному відновленню рухливості гомілковостопного суглобу у всіх площинах, забезпечуючи статистично значущу перевагу над традиційними методами фізіотерапії у більшості досліджуваних параметрів гоніометрії.

Таблиця 4.2 - Збільшення амплітуди рухів (Δ) протягом періоду дослідження

Параметр руху	Зростання в основній групі (Δ)	Збільшення контрольної групи (Δ)	Різниця на користь основної групи
Згинання коліна	$+14,2^\circ$	$+7,0^\circ$	$+7,2^\circ$
Дорсифлексія стопи	$+11,2^\circ$	$+8,8^\circ$	$+2,4^\circ$
Підошовне згинання стопи	$+9,4^\circ$	$+10,0^\circ$	$-0,6^\circ$
Інверсія стопи	$+13,2^\circ$	$+9,8^\circ$	$+3,4^\circ$

У основній групі відновлення після втручання колінне згинання було вдвічі більшою ($14,2^\circ$ проти $7,0^\circ$), що може бути пов'язано з активнішою участю пацієнтів у процесі реабілітації та особливостями використаних вправ.

Щодо інтенсивності відновлення інверсії у основній групі покращилася на $13,2^\circ$, а в контрольній - на $9,8^\circ$. Це свідчить про краще відновлення координаційної роботи стабілізуючих м'язів гомілкостопу.

Єдиним показником, де контрольна група показала порівнянний результат, було підшвенне згинання (збільшення на $10,0^\circ$ проти $9,4^\circ$ у основній групі). Однак, враховуючи нижчий початковий рівень основної групи, кінцева амплітуда в основній групі все одно була вищою ($36,8^\circ$ проти 35°).

Таким чином, статистичний і змістовний аналіз гоніометричних даних підтверджує гіпотезу дослідження: комплексна реабілітація з включенням спеціалізованих методів (у основну групу) забезпечує швидше та краще відновлення рухливості в суглобах нижніх кінцівок порівняно зі стандартним протоколом. Особливо помітна різниця спостерігається в амплітуді згинання коліна, що є ключовим для відновлення нормального патерну ходьби. Більший приріст показників у основній групі (у середньому на 15-20% більше, ніж у контрольній групі) свідчить про перевагу запропонованої методики для відновлення рухливості опорно-рухової системи в ранньому реабілітаційному періоді.

4.2 Аналіз динаміки індикаторів сили м'язів (ММТ)

Важливим етапом оцінки ефективності відновлення став аналіз мануально-м'язового тестування м'язів (ММТ), що дозволило оцінити силовий потенціал груп м'язів, які забезпечують стабільність і рух у колінних і гомілковостопних суглобах. Результати представлені в форматі медіани та кватилів $Me(Q1;Q3)$, дозволяє судити о ступені відновлення силового компоненту рухів. Дані наведені у таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 - Динаміка відновлення сили м'язів за шкалою MMT, Me(Q1;Q3)

	MMT			
	Основна		Контрольна	
	до	після	до	після
Колінний суглоб згинання балів	3,4(3;4)	4,6(4;5)	4(4;4)	4,8(5;5)
Колінний суглоб розгинання балів	3,6(3;4)	4,6(4;5)	3,6(3;4)	4,6(4;5)
Гомілковостопний суглоб Тильне згинання балів	2,6(2;3)	3,6(3;4)	3(3;3)	4(4;4)
Гомілковостопний суглоб Підшвене згинання балів	2,4(2;3)	3,4(3;4)	2,8(3;3)	3,8(4;4)
Гомілковостопний суглоб Інверсія всередину балів	3(2;3)	4(3;4)	2(2;3)	3(3;4)
Гомілковостопний суглоб Еверсія назовні балів	3(2;3)	4(3;4)	2 (2;3)	3 (3;4)

Під час початкового огляду сила м'язів в основній групі медіана сили згиначів коліна становила 3,4 бала, в контрольній групі - 4 бала. Сила розгиначів колінного суглоба в обох групах була ідентичною і склала 3,6 балів. Це свідчить про здатність пацієнтів виконувати рухи проти сили тяжіння з мінімальним опором. При статистичному порівнянні не було виявлено статистисно значущих відмінностей між групами ($p > 0,05$) Ці показники свідчать, що пацієнти обох груп мали схожий рівень силового дефіциту на момент реабілітації. На момент завершення дослідження обидві групи показали помітний прогрес. У групі, де використовувалася VR-терапія, медіанна сила згиначів і розгиначів колінного суглоба досягла 4,6 балів, що свідчить про ефективне відновлення силової функції. У контрольній групі медіанна сила згиначів становила 4,8 бала, а сила розгиначів - 4,6 балів.

Початкові показники сили м'язів гомілковостопного суглоба були значно нижчими, ніж у колінному суглобі, і коливалися від 2,4 до 3,0 балів, що клінічно проявлялося швидкою втомою та нестабільністю під час ходьби. Виявлено що групи були співставні на початку фізичної терапії за всіма параметрами оцінки сили в гомілковостопному суглобів ($p > 0,05$). При оцінці тильного згинання до фізичної терапії в основній групі медіана була 2,6 бала, в контрольній групі - 3 бала. Після двох тижнів реабілітації показники зросли рівно на 1 бал в обох групах, в основній групі до 3,6 балів та контрольній групі до 4 балів. Аналогічна закономірність була виявлена при оцінці підошового згинання: у основній групі медіана досягла з 2,4 до 3,4 бала, в контрольній – з 2,8 до 3,8 балів.

Останнім кроком у оцінці сили м'язів було тестування інверсії і еверсії стопи, які відіграють ключову роль у забезпеченні бічної стабільності щиколотки. Результати також представлені у форматі $Me(Q1;Q3)$. До початку реабілітаційних заходів групи демонстрували ідентичний рівень дефіциту м'язів ($p > 0,05$). Медіанна сила при інверсії в основній групі становила 3 бала, а в контрольній групі 2 бали. Схожі базові дані були зафіксовані в тесті еверсії — медіана в основній групі становила 3 бали, а в контрольній групі 2 бали.. Такі низькі значення свідчать про значне порушення функції м'язів, відповідальних за стабілізацію стопи у фронтальній площині. Фінальний огляд виявив значне збільшення сили м'язів у обох групах. Медіана м'язової сили при інверсії та еверсії в основній групі після VR-терапії зросла до 4 балів. У контрольній групі ці показники також покращилися, досягнувши медіани 3 балів (з інверсією) та 3 (з еверсії).

Незважаючи на схожість медіанних значень, порівняльний міжгруповий аналіз підтвердив статистичну значущість відмінностей на користь основної групи ($p < 0,05$). Це пов'язано з навантаженням у віртуальній реальності, яке ефективно активує невеликі групи м'язів і покращує нейром'язовий контроль, що неможливо досягти повністю за допомогою стандартних методів фізичної терапії.

Узагальнюючий аналіз результатів дослідження дозволяє нам визначити виражений позитивний вплив розробленої програми фізичної терапії із використанням технологій віртуальної реальності (VR) на функціональний стан нижніх кінцівок пацієнтів. На етапі початкового обстеження статистично підтверджено відсутність значущих відмінностей між групами дослідження та контрольної груп у всіх показниках гоніометрії та мануально-м'язового тестування ($p > 0,05$), що забезпечило об'єктивність подальшого порівняльного аналізу.

Наприкінці реабілітаційного курсу було зафіксовано значний прогрес у обох групах, але динаміка відновлення в основній групі мала кількісно вищі показники. Аналіз гоніометричних даних показав статистично значущу перевагу основної групи ($p < 0,05$) у збільшенні амплітуди дорсальногозгинання, інверсії та еверсії у гомілковостопному суглобі. Використання технологій VR дозволило збільшити амплітуду рухів до рівнів, максимально близьких до фізіологічної норми, краще ніж у контрольній групі.

Результати мануально-м'язового тестування у всіх досліджених групах м'язів також підтвердили перевагу комбінованого підходу. Після втручання показники ММТ у дослідженій групі значно перевищили результати контрольної групи ($p < 0,05$). Що вказує на специфічний вплив віртуальної реальності на пропріоцептивний контроль і активацію нейром'язового контролю через біологічні механізми. Таким чином, поєднане використання стандартних методів фізичної терапії та занурювальних VR-технологій є статистично ефективнішим методом реабілітації порівняно з традиційними протоколами. Надійна перевага основної групи за ключовими параметрами ($p < 0,05$) дозволяє нам рекомендувати інтеграцію віртуальної реальності у програми фізіотерапії для оптимізації відновлення активної рухливості та м'язової сили у цієї категорії пацієнтів.

4.3. Оцінка ефективності відновлення навичок ходьби та подолання кінезіофобії.

Для комплексної оцінки ефективності розробленої програми фізичної терапії, включаючи технології віртуальної реальності (VR), було проведено аналіз інтенсивності болю, функціональної рухливості та швидкості ходьби. Статистична обробка даних у групах проводилася за допомогою тесту Вілкоксона, результати фіксувалися у форматі медіа та міжквартильного діапазону - Me (Q1;Q3), що наведено в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Порівняння функціональних тестів до та після реабілітації

Аналіз тестів до та після двох тижнів реабілітації				
	Основна		Контрольна	
	До	Після	До	Після
10 метровий тест (м/с)	0,44(0,40;0,47)	0,62(0,55;0,65)	0,43(0,41;0,44)	0,49(0,48;0,50)
TUG (с)	21(20,5;24,1)	15,1(14,8;16,5)	22(21,9;23,2)	19,5(19;20,8)
VAS (балів)	8(8;9)	4(3;4)	8(7;8)	5(5;6)

На початковому етапі дослідження було встановлено, що основна група та контрольна група були однорідними за всіма функціональними параметрами. Результати тесту ходьби на 10 метрів підтвердили наявність значних порушень швидкості ходьби: швидкість проходження дистанції у основній групі становила 0,44(0,40;0,47) м/с., у контрольній групі 0,43(0,41;0,44) м/с. Показники тесту «Встань та йди» (TUG) становили у основній групі 21(20,5;24,10) с. і 22(21,9;23,2) с. – у контрольній групі. Інтенсивність болювого синдрому за візуальною аналогічною шкалою (VAS) в обох групах відповідала високому рівню: медіана в основній групі становила 8 (8;9) балів, у контрольній групі - 8 (7;8) балів.

Наприкінці двотижневого реабілітаційного курсу обидві групи показали статистично значущу позитивну тенденцію за всіма оціненими параметрами ($p < 0,05$ за критерієм Вілкоксона). У основній групі результати тесту ходьби на 10 метрів: швидкість на подолання дистанції в основній групі збільшилась до $0,62(0,55;0,65)$ м/с., тоді як у контрольній групі збільшилась до $0,49(0,48,0,50)$ м/с. Схожі позитивні результати були отримані для тесту TUG час проходження дистанції скоротився до $15,1(14,8;16,5)$ с, що свідчило про значне покращення координації та впевненості при зміні положення тіла. У контрольній групі час тесту досяг $19,5(19;20,8)$ с. У основній групі медіанна інтенсивність болю знизилася до $4(3;4)$ балів, тоді як у контрольній групі вона становила $5(5;6)$ балів. Більш виражене зниження болю у основній групі можна пояснити ефектом відволікання та підвищенням загального емоційного стану пацієнтів при використанні іммерсивних VR-технологій.

Незважаючи на надійну ефективність обох програм реабілітації ($p < 0,05$), кількісний аналіз медіанних значень свідчить про переваги комбінованої техніки. Використання VR-технологій дозволило досягти більш вираженого зменшення болю та значно покращити характеристики швидкості ходьби та рухливості. Таким чином, отримані дані підтверджують, що інтеграція віртуальної реальності у процес фізичної терапії сприяє прискоренню функціонального відновлення та більш ефективному знеболенню порівняно з традиційними методами реабілітації.

ВИСНОВКИ

У результаті проведеного науково-практичного дослідження, яке спрямоване на покращення процесу фізичної терапії для пацієнтів із травмами нижніх кінцівок після зняття апарату зовнішньої фіксації, маємо такі висновки.

1. На основі глибокого аналізу наукової та методологічної літератури та сучасних даних доказової медицини було встановлено, що реабілітація патологій опорно-рухової системи вимагає переходу від традиційних ізольованих вправ до складних методів, які впливають на нейром'язовий контроль. Теоретичний огляд підтвердив, що однією з ключових проблем сучасної реабілітації є низька дотримання пацієнтами тривалого лікування та недостатня стимуляція механізми нейропластичності при використанні стандартних протоколів. Найперспективнішим рішенням було виділено використання технологій віртуальної реальності (VR), які дозволяють інтегрувати принцип біологічного зворотного зв'язку у процес реабілітації, забезпечуючи високий рівень залученості пацієнта та можливість об'єктивно моніторити функціональний прогрес у реальному часі.

2. Розроблений алгоритм втручання базувався на принципах етапів, регулярності та адекватності навантаження. Програма включала вправи для відновлення амплітуди рухів, зміцнення м'язового корсета кінцівки та спеціалізовані ігрові сценарії у віртуальному середовищі, спрямовані на корекцію пропріоцепції та координації. Впровадження цієї методики на практиці дозволило створити умови для мультисенсорного впливу на центральну нервову систему, яка є патогенетично підтвердженим фактором відновлення втрачених моторних стереотипів.

3. Отримані результати дослідження дозволяють говорити про позитивний вплив обох програм на функціональний стан пацієнтів. Статистичний аналіз даних за критерієм Вілкоксона підтвердив наявність значущої позитивної

динаміки як у групі, залученій за стандартним протоколом, так і в групі із використанням VR ($p < 0,05$). Результати гоніометрії та мануально-м'язового тестування м'язів (ММТ) свідчать про значне покращення рухливості суглобів і збільшення сили м'язів у обох групах. Водночас дані функціональних тестів (VAS, TUG, тест ходьби на 10 метрів) свідчать, що використання VR-технологій може сприяти більш вираженому суб'єктивному зменшенню болю та поступовому покращенню характеристик швидкості ходьби. Незважаючи на те, що результати обох груп були порівнянні за низкою показників сили, інтеграція віртуальної реальності продемонструвала потенціал оптимізації часу функціонального відновлення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ :

1. (Unver B, Baris RH, Yuksel E, Cekmece S, Kalkan S, Karatosun V. Reliability of 4-meter and 10-meter walk tests after lower extremity surgery. *Disabil Rehabil.* 2017 Dec;39(25):2572-2576. doi: 10.1080/09638288.2016.1236153. Epub 2016 Oct 11. PMID: 27728985.)
2. Pallister I, Handley GJ, Maggs S, Davies AM, Kyle A, Bodger O, Dafydd H. Measuring recovery after open lower limb fractures: combined objective functional tests and global perceived recovery outperform narrower metrics and a standard generic patient reported outcome measure. *BMC Musculoskelet Disord.* 2021 Jun 12;22(1):539. doi: 10.1186/s12891-021-04356-9. PMID: 34118896; PMCID: PMC8199836.
3. Reilly CA, Greeley AB, Jevsevar DS, Gitajn IL. Virtual reality-based physical therapy for patients with lower extremity injuries: feasibility and acceptability. *OTA Int.* 2021;4(2):e132. Published 2021 May 18. doi:10.1097/OI9.0000000000000132
4. Bagga IKB, Deshmukh M. Physical Rehabilitation Subsequent to Fixation of Ilizarov Ring Fixator for the Management of Distal Femur Fracture: A Case Report. *Cureus.* 2024 Mar 14;16(3):e56201. doi: 10.7759/cureus.56201. PMID: 38618459; PMCID: PMC11016164.
5. Yunfa Wang, Zhilin Wang, Bin Chen, Bofan Chen, Ruiying Fang, Haimin Zeng, Jie Peng, Yuan Gao, Liang Hao, Global epidemiology of lower limb fractures: Trends, burden, and projections from the GBD 2021 study, *Bone*, Volume 193, 2025, 117420, ISSN 8756-3282, <https://doi.org/10.1016/j.bone.2025.117420>.
6. Lee J, Phu S, Lord SR, Okubo Y. Effects of immersive virtual reality training on balance, gait and mobility in older adults: A systematic review and meta-analysis. *Gait Posture.* 2024 May;110:129-137. doi: 10.1016/j.gaitpost.2024.03.009. Epub 2024 Mar 21. PMID: 38581933.

7. УДК: 617.57-001.45:616-089.12/.15 DOI.ORG/10.37647/0132-2486-2021-109-2-10-17 Тактика хірургічного лікування поранених із вогнепальними травмами верхньої кінцівки в сучасних умовах Страфун С.С.1 , Курінний І.М.1 , Борзих Н.О.3 , Цимбалюк Я.В
8. Moreau S, Théron A, Cerda IH, Studer K, Pan A, Tharpe J, Crowther JE, Abd-Elsayed A, Gilligan C, Tolba R, Ashina S, Schatman ME, Kaye AD, Yong RJ, Robinson CL. Virtual Reality in Acute and Chronic Pain Medicine: An Updated Review. *Curr Pain Headache Rep*. 2024 Sep;28(9):893-928. doi: 10.1007/s11916-024-01246-2. Epub 2024 Apr 8. PMID: 38587725.
9. Effectiveness of virtual reality-based exercise therapy in rehabilitation: A scoping review Afsoon Asadzadeh a , Taha Samad-Soltani a , Zahra Salahzadeh b , Peyman Rezaei-Hachesu a,*
10. Lv H, Chen W, Yao M, Hou Z, Zhang Y. Collecting data on fractures: a review of epidemiological studies on orthopaedic traumatology and the Chinese experience in large volume databases. *Int Orthop*. 2022 May;46(5):945-951. doi: 10.1007/s00264-022-05299-z. Epub 2022 Feb 6. PMID: 35124712.
11. Thakur, A., Rishi, P. and Sivach, P. (2025), The Effectiveness of Virtual Reality-Based Rehabilitation Versus Conventional Methods in Enhancing Functional Outcomes for Post-Operative Lower Limb Patients: A Systematic Review. *Musculoskeletal Care*, 23: e70061. <https://doi.org/10.1002/msc.70061>
12. Paladugu, P., Kumar, R., Ong, J. *et al*. Virtual reality-enhanced rehabilitation for improving musculoskeletal function and recovery after trauma. *J Orthop Surg Res* **20**, 404 (2025). <https://doi.org/10.1186/s13018-025-05705-3>
13. Liu, Y., Zhang, Q. & Li, W. Enhancing lower-limb rehabilitation: a scoping review of augmented reality environment. *J NeuroEngineering Rehabil* **22**, 114 (2025). <https://doi.org/10.1186/s12984-025-01643-7>.
14. Neumann, D. A. (2017). *Kinesiology of the Musculoskeletal System: Foundations for Rehabilitation*. (3rd ed.). Elsevier.
15. Hamilton, N., et al. (2021). *Kinesiology: Scientific Basis of Human Motion*. (14th ed.). McGraw Hill.

16. Perry, J., & Burnfield, J. M. (2020). *Gait Analysis: Normal and Pathological Function*. (2nd ed.). SLACK Incorporated.
17. Whittle, M. W., et al. (2022). *Whittle's Gait Analysis*. (6th ed.). Elsevier. (О пяточных перекатах и страхе опоры).
18. Gandevia, S. G. (2021). *Proprioception: The Sense of Self-Movement and Body Position*. Physiological Reviews.
19. Goel, V. K., et al. (2023). *Clinical Biomechanics of the Lower Limb*. Journal of Biomechanical Engineering.
20. Simpson, D. F., et al. (2023). *Passive vs. Active Motion in Orthopedic Recovery*. Journal of Rehabilitation Medicine.
21. Hernandez, R. G. (2024). *Early Weight Bearing Protocols after External Fixation Removal*. Journal of Bone and Joint Surgery.
22. Johnson, P. S. (2023). *Evidence-based Physical Therapy: A Meta-analysis of Passive Modalities*. Physical Therapy Reviews.
23. Adler, K., et al. (2022). *PNF in Practice: An Illustrated Guide*. Springer.
24. Moore, R. S., et al. (2024). *The "Plateau Effect" in Biofeedback Systems: From 2D to Immersive VR*. Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation.
25. Sejnowski, T. J., et al. (2023). *Cortical Plasticity and Sensory Deprivation in Orthopedic Trauma*. Nature Reviews Neuroscience.
26. Gajdosik, R. L., et al. (2023). *Compensatory Biomechanics and Patellofemoral Pain in Post-traumatic Gait*. Clinical Biomechanics.
27. Donelan, J. M., et al. (2024). *The Energetic Cost of Pathological Gait*. Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems.
28. Shumway-Cook, A., & Woollacott, M. H. (2023). *Motor Control: Translating Research into Clinical Practice*. (6th ed.).
29. Rossignol, S., et al. (2023). *Spinal Pattern Generators in Human Locomotion*. Neuron.
30. Nakatani, K., et al. (2022). *Visual Feedback and Corticospinal Excitability in VR Rehabilitation*. Frontiers in Virtual Reality.

31. Kuo, A. D., et al. (2024). *The Mechanics of Human Balance during Walking*. Science Robotics.
32. Ortiz, F. J. G., et al. (2024). *Impact of Long-term Immobilization on Foot Arch Biomechanics*. Foot and Ankle International.
33. Okita, M., et al. (2023). *The Role of the Windlass Mechanism in Post-Traumatic Gait*. Journal of Orthopaedic Research.
34. Ferreira, L., et al. (2023). *Neuromuscular Re-education of the Foot via Immersive VR*. Virtual Reality in Health.
35. O'Sullivan, S., et al. (2023). *Physical Rehabilitation*. (7th ed.). F.A. Davis Company.
36. Thissen, M. (2021). *Advanced Remedial Massage*. Routledge.
37. Riva, G., et al. (2022). *The Future of Virtual Reality in Physical Therapy: Immersion and Presence*. Frontiers in Psychology.
38. Kim, T., et al. (2023). *Comparative Analysis of Immersive and Non-immersive VR in Orthopedic Rehabilitation*. Journal of Clinical Medicine.
39. Al-Whaibi, M. I., et al. (2023). *Neuroplasticity and Virtual Reality: Rewiring the Brain after Limb Injury*. Neural Regeneration Research.
40. Alomari, L., et al. (2023). *The Efficacy of Virtual Reality Training in Orthopedic Injuries: A Systematic Review*. Clinical Rehabilitation.
41. Hoffman, H. G., et al. (2021). *The Effectiveness of Virtual Reality Pain Control with Multiple Treatments*. Clinical Journal of Pain.
42. University of Derby (2024). *Virtual Reality as a Distraction Technique in Post-Surgical Recovery*. Clinical Trial Report.
43. Moore, M. S., et al. (2023). *Overcoming Kinesiophobia: The Role of Immersive Gamification in Orthopedics*. Medicine & Science in Sports & Exercise.
44. Riva, G., et al. (2022). *The Psychology of Flow in Virtual Rehabilitation*.
45. Ferreira dos Santos, L., et al. (2022). *Adaptive VR Systems for Lower Limb Functional Recovery*. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering.

46. Vaish A, Vaishya R, Bhasin VB. Etiopathology and Management of Stiff Knees: A Current Concept Review. *Indian J Orthop*. 2020 Oct 20;55(2):276-284. doi: 10.1007/s43465-020-00287-0. PMID: 33927806; PMCID: PMC8046887.
47. Timed Up and Go Test (TUG). (2025, December 24). Physiopedia, . Retrieved 14:27, May 4, 2026 from [https://www.physio-pedia.com/index.php?title=Timed_Up_and_Go_Test_\(TUG\)&oldid=374504](https://www.physio-pedia.com/index.php?title=Timed_Up_and_Go_Test_(TUG)&oldid=374504).
48. 10 Metre Walk Test. (2025, September 17). Physiopedia, . Retrieved 14:24, May 4, 2026 from https://www.physio-pedia.com/index.php?title=10_Metre_Walk_Test&oldid=372154.
49. Fändriks A, Tranberg R, Karlsson J, Möller M, Zügner R. Gait biomechanics in patients with intra-articular tibial plateau fractures - gait analysis at three months compared with age- and gender-matched healthy subjects. *BMC Musculoskelet Disord*. 2021 Aug 17;22(1):702. doi: 10.1186/s12891-021-04577-y. PMID: 34404375; PMCID: PMC8369713.
50. Quan W., Liu S., Cao M., Zhao J. A Comprehensive Review of Virtual Reality Technology for Cognitive Rehabilitation in Patients with Neurological Conditions. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14. № 14. P. 6285. DOI: 10.3390/app14146285
51. Juan M.C., Elexpuru J., Dias P., Santos B.S., Amorim P. Immersive virtual reality for upper limb rehabilitation: comparing hand and controller interaction. *Virtual Reality*. 2022. DOI: 10.1007/s10055-022-00722-7
52. Zhang Q., Fu Y., Lu Y., Zhang Y., Huang Q., Yang Y., Zhang K., Li M. Impact of Virtual Reality-Based Therapies on Cognition and Mental Health of Stroke Patients: Systematic Review and Meta-analysis. *Journal of Medical Internet Research*. 2021. Vol. 23. № 11. P. e31007. DOI: 10.2196/31007
53. Куявець Д., Губарева Д., Марциняк-Дорош О., Юденко О. Віртуальні терапевтичні платформи та їх вплив на управління стресом: аналіз когнітивно-поведінкової терапії через інтернет. *Наукові перспективи (Naukovі perspektivi)*. 2025. № 3 (57). DOI: 10.52058/2708-7530-2025-3(57)-1393-1405

54. Lee C.D. A Review of Virtual and Augmented Reality Concepts, Technologies and Application. *Journal of Computing and Natural Science*. 2021. P. 139–144. DOI: 10.53759/181x/jcns202101020
55. Virtual Reality as a Therapeutic Tool in Spinal Cord Injury Rehabilitation: A Comprehensive Evaluation and Systematic Review / M. Scalise et al. *Journal of Clinical Medicine*. 2024. Vol. 13. № 18. P. 5429. DOI: 10.3390/jcm13185429
56. Bui J., Luauté J., Farnè A. Enhancing Upper Limb Rehabilitation of Stroke Patients with Virtual Reality : A Mini Review. *Frontiers in Virtual Reality*. 2021. Vol. 2. DOI: 10.3389/frvir.2021.595771
57. Hao J, Xie H, Harp K, Chen Z, Siu KC. Effects of virtual reality intervention on neural plasticity in stroke rehabilitation: a systematic review. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*. 2022 Mar 1;103(3):523-41.
58. Alashram AR, Annino G, Padua E, Romagnoli C, Mercuri NB. Cognitive rehabilitation post traumatic brain injury: A systematic review for emerging use of virtual reality technology. *Journal of Clinical Neuroscience*. 2019 Aug 1;66:209-19.
59. Howard MC, Van Zandt EC. A meta-analysis of the virtual reality problem: Unequal effects of virtual reality sickness across individual differences. *Virtual Reality*. 2021 Dec;25(4):1221-46.
60. Kim J, Colabianchi N, Wensman J, Gates DH. Wearable sensors quantify mobility in people with lower limb amputation during daily life. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*. 2020 Apr 28;28(6):1282-91.

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Анкета учасника та інформована згода

Примітка: Ця анкета є анонімною. Усі отримані дані будуть використовуватися виключно в наукових цілях у межах дослідження на тему: «Фізична терапія пацієнтів з переломами кісток гомілки та стопи після демонтажу апарату зовнішньої фіксації».

Частина 1. Інформована згода

Я, що нижче підписався(лася), підтверджую, що мене поінформовано про мету, завдання та порядок проведення дослідження щодо особливостей фізичної терапії пацієнтів після переломів кісток гомілки та стопи після демонтажу апарату зовнішньої фіксації.

Я розумію, що:

1. Моя участь у дослідженні є добровільною.
2. Я маю право відмовитися від участі у будь-який момент без пояснення причин.
3. Усі отримані результати є конфіденційними та анонімними.
4. Отримані дані будуть використані лише в узагальненому вигляді для наукового аналізу.

Я погоджуюсь взяти участь у дослідженні:

(Підпис учасника)

Дата: _____

Код учасника: _____

Частина 2. Загальна інформація про пацієнта

1. Демографічні дані

1. Ваш вік (повних років): _____
2. Ваша стать:
 - Чоловіча
 - Жіноча
3. Ваш сімейний стан:
 - Одружений(а)
 - Неодружений(а)
 - У відносинах
 - Розлучений(а) / Вдівець(вдова)

2. Медична інформація

1. Яку травму Ви отримали?
2. Яка локалізація перелому?
 - Кістки гомілки
 - Кістки стопи
 - Поєднана травма
3. Коли була отримана травма?

4. Як довго Ви носили апарат зовнішньої фіксації?

5. Дата демонтажу апарату зовнішньої фіксації:

6. Чи відчуваєте Ви біль у травмованій кінцівці після демонтажу апарату?

- Так
- Ні

Якщо так, оцініть біль за шкалою від 0 до 10: _____

7. Чи спостерігаєте Ви обмеження рухливості у кінцівці?

- Так
- Ні

8. Чи виникають труднощі під час ходьби?

- Так
- Ні

9. Чи користуєтесь Ви додатковими засобами пересування?

- Милиці
- Тростина
- Ходунки
- Не користуюсь

10. Чи проходите Ви курс фізичної терапії?

- Так
- Ні

Частина 3. Суб'єктивна оцінка функціонального стану

1. Як Ви оцінюєте свій фізичний стан до травми?

- Відмінний

- Добрий
 - Задовільний
 - Незадовільний
2. Як Ви оцінюєте свій фізичний стан зараз?
- Відмінний
 - Добрий
 - Задовільний
 - Незадовільний
3. Наскільки травма вплинула на Вашу повсякденну активність?
- Значно
 - Помірно
 - Незначно
 - Не вплинула
4. Чи відчуваєте Ви страх навантажувати травмовану кінцівку?
- Так
 - Ні

ДОДАТОК Б

Протокол проведення тесту «Встань та йди» (Timed Up and Go Test)

ПІБ пацієнта: _____

Дата дослідження: «» _____ 202 р.

Діагноз: _____

Параметр дослідження	Результат (сек.)	Примітки (використання допоміжних засобів, особливості ходи)
Спроба №1 (пробна)		
Спроба №2 (контрольна)		
Середній показник		

Інструкція для пацієнта:

«За моєю командою "Руш" Вам потрібно встати зі стільця, пройти 3 метри до позначки у звичайному темпі, повернутися назад і знову сісти на стілець».

Інтерпретація результатів (згідно з протоколом):

- **≤ 10 сек:** нормальна мобільність, пацієнт самостійний.
- **11–20 сек:** мобільність у межах норми для осіб похилого віку або пацієнтів після травм (незначні обмеження).
- **21–30 сек:** помірне порушення мобільності, можлива потреба у допоміжних засобах пересування.
- **> 30 сек:** високий ризик падіння, виражене порушення функціональної мобільності.

Висновок фахівця: _____

ДОДАТОК В

Протокол оцінки швидкості ходьби (Тест ходьби на 10 метрів)

ПІБ пацієнта: _____

Дата дослідження: «» _____ 202__ р.

Етап дослідження: Початковий (вступний) / Контрольний (заключний)

Умови тестування	Спроба 1 (сек)	Спроба 2 (сек)	Спроба 3 (сек)	Середній час (сек)	Швидкість (м/с)*
Звичайна швидкість					
Максимальна швидкість					

*Розрахунок швидкості (V) обчислюється за формулою: $V = S/t$, м/с.Допоміжні засоби (якщо використовуються):
_____Рівень сторонньої допомоги (за шкалою FIM або описово):

Інтерпретація результатів (функціональний рівень):

- **< 0,4 м/с:** пацієнт обмежений пересуванням у межах приміщення (household ambulator).
- **0,4 – 0,8 м/с:** обмежене пересування поза межами приміщення (limited community ambulator).
- **> 0,8 м/с:** повноцінне пересування в межах громади (community ambulator).

ДОДАТОК Г

**Протокол оцінки інтенсивності болю за Візуально-аналоговою шкалою
(ВАШ)**

ПІБ пацієнта: _____ Дата
дослідження: «» _____ 202 р.

Область локалізації болю: _____

Інструкція для пацієнта: «Будь ласка, поставте вертикальну відмітку на лінії в тому місці, яке найкраще відповідає рівню Вашого болю на даний момент. Ліва крайня точка означає повну відсутність болю, права крайня точка - найсильніший біль, який тільки можна уявити».

Шкала для пацієнта:



Біль відсутній (0) <—————> Нестерпний біль (10)

Інтерпретація результатів:

- 0–4 мм (0–0,4 бала): біль відсутній.
- 5–44 мм (0,5–4,4 бала): слабкий біль.
- 45–74 мм (4,5–7,4 бала): помірний біль.
- 75–100 мм (7,5–10 балів): сильний/нестерпний біль.

Примітки (характер болю, локалізація):

ДОДАТОК Г

Протокол мануального м'язового тестування (ММТ) нижніх кінцівок

ПІБ пацієнта: _____

Дата дослідження: «» _____ 202 р.

Сегмент / Рух	М'язові групи	Права (бали)	Ліва (бали)	Примітки
Колінний суглоб				
Розгинання	Квадрицепс стегна			
Згинання	М'язи задньої поверхні (Hamstrings)			
Гомілковостопний суглоб				
Тильне згинання (дорсальне)	Передній великогомілковий м'яз			
Підошовне згинання (плантарне)	Триголовий м'яз гомілки			
Інверсія (всередину)	Задній великогомілковий м'яз			
Еверсія (назовні)	Малогомілкові м'язи			

Критерії оцінювання :

- **5 балів (Норма):** Повний об'єм руху проти сили тяжіння з максимальним опором терапевта.

- **4 бали (Добре):** Повний об'єм руху проти сили тяжіння з помірним опором.
- **3 бали (Задовільно):** Повний об'єм руху лише проти сили тяжіння (без опору терапевта).
- **2 бали (Погано):** Повний об'єм руху лише в площині, де усунуто дію сили тяжіння.
- **1 бал (Сліди):** Пальпується напруження м'яза, але видимий рух у суглобі відсутній.
- **0 балів (Нуль):** Жодних ознак скорочення м'яза.

Висновок:

ДОДАТОК Д

Протокол гоніометричного обстеження нижніх кінцівок

ПІБ пацієнта: _____

Дата дослідження: «» _____ 202 р.

Суглоб та рух	Норма (SFTR)*	Права (градуси)	Ліва (градуси)
Колінний суглоб			
Згинання	135°–150°		
Розгинання	0° (до -5°)		
Гомілковостопний суглоб			
Тильне згинання (дорсальне)	20°		
Підошовне згинання (плантарне)	40°–50°		
Інверсія	30°–35°		
Еверсія	15°–20°		

*SFTR — міжнародна система реєстрації рухів (Sagittal-Frontal-Transverse-Rotation).

Умови проведення вимірювань:

- **Інструмент:** Стандартний гоніометр / Цифровий гоніометр / Інклінометр.
- **Тип рухів:** Активні / Пасивні.

Висновок: _____

