



## Роботизований екзоскелет ReWalk як засіб реабілітації хворих з наслідками хребетно-спинномозкової травми

Федяй О.О., Федяй І.О.

Харківська державна академія фізичної культури  
м. Харків, Україна

**Анотація. Мета:** визначити ефективність застосування роботизованого екзоскелету ReWalk у процесі реабілітації хворих з хребетно-спинномозковою травмою. **Матеріал і методи:** проведено аналіз 35 джерел літератури з досліджень застосування роботизованих екзоскелетів та екзоскелету ReWalk в реабілітаційному процесі. **Результати:** на основі вивчених та проаналізованих результатах і статистичних даних досліджень, виявлено високу ефективність використання ReWalk у відновному процесі хворих з наслідками травми спинного мозку.

**Висновки:** роботизований екзоскелет ReWalk дає можливість хворим з хребетно-спинномозковою травмою з мінімальними зусиллями переходити у вертикальне положення, ходити, виконувати розвороти, підніматися, спускатися сходами. Його використання значно розширює можливості самообслуговування та незалежність від сторонньої допомоги, а також призводить до зменшення ризику виникнення вторинних ускладнень.

**Ключові слова:** нейрореабілітація, хребетно-спинномозкова травма, роботизований екзоскелет, екзоскелет ReWalk.

**Вступ.** Хребетно-спинномозкова травма (ХСМТ) – одна з найскладніших проблем сучасної нейрохірургії та нейрореабілітації, загальна частота якого становить 23 випадків на мільйон, що становить 180 000 випадків на рік по всьому світу. У США щороку реєструють близько 8–10 тисяч нових випадків ускладненої хребетно-спинномозкової травми, в Україні ця цифра складає 2–3 тисячі на рік.[2;24].

Усі хворі з тяжкою ускладненою хребетно-спинномозковою травмою, як правило, мають глибокий стійкий неврологічний дефіцит, що вкрай важко піддається лікуванню та реабілітації. Незважаючи на узгоджені зусилля по розробці медичних та хірургічних втручань, призначених для мінімізації хронічного неврологічного дефіциту при гострій ХСМТ, відновлення фізичної функції залишається обмеженою завдяки швидким дегенеративним процесам, таким як нейротоксичність, судинна дисфункція, гліальне рубцювання, нейрозапалення, апоптоз і демієлінізація. За таких обставин такі пацієнти в подальшому вимушені використовувати інвалідні візки як основний засіб переміщення. Це в свою чергу дуже обмежує їхні можливості в пересуванні, побутовій діяльності та самообслуговуванні, а це вкрай негативно позначається на якості життя та життєвій активності, та призводить до посилення ризику розвитку таких ускладнень як остеопороз, серцево-судинні захворювання, дихальні проблеми, пролежні, м'язова спастичність та контрактури [1].

Відновлення руху та навички ходьби є пріоритетним завданням у реабілітації хворих з ХСМТ [11]. На додаток до розширення рухових можливостей та соціальної активності регулярна ходьба має основне значення при подоланні вторинних медичних проблем пов'язаних з відсутністю активного вагового навантаження на нижні кінцівки у зазначених пацієнтів [4;24]. Для вирішення вищевказаного завдання в реабілітаційному процесі широко використовуються різні ортопедичні засоби та технології.

Найпоширенішими серед таких засобів є механічні ортези типу стegno-коліно-гомілка-стопа (Hip-Knee-Ankle-Foot orthosis (HKAFO)) та реципрокний ортез



(Reciprocating gait orthosis (RGO)). За допомогою цих засобів хворий може переміщуватися самостійно або з ходунками чи милицями Застосування вказаних ортезів у відновлюваному лікуванні пацієнтів з ХСМТ має перемінний успіх. Ортез НКАФО є важким та не забезпечує правильного патерну ходьби. Перевагою реципрокного ортезу RGO над ортезами НКАФО є те, що він має механізм, який забезпечує рух нижніх кінцівок так, що згинання одного стегна призводить до розгинання іншого. Проте, незважаючи на це, досягти правильного патерну ходьби в реципрокних ортезах залишається неможливим у зв'язку з повною фіксацією колінних суглобів [8;17;27;31] (рис 1 а, b).

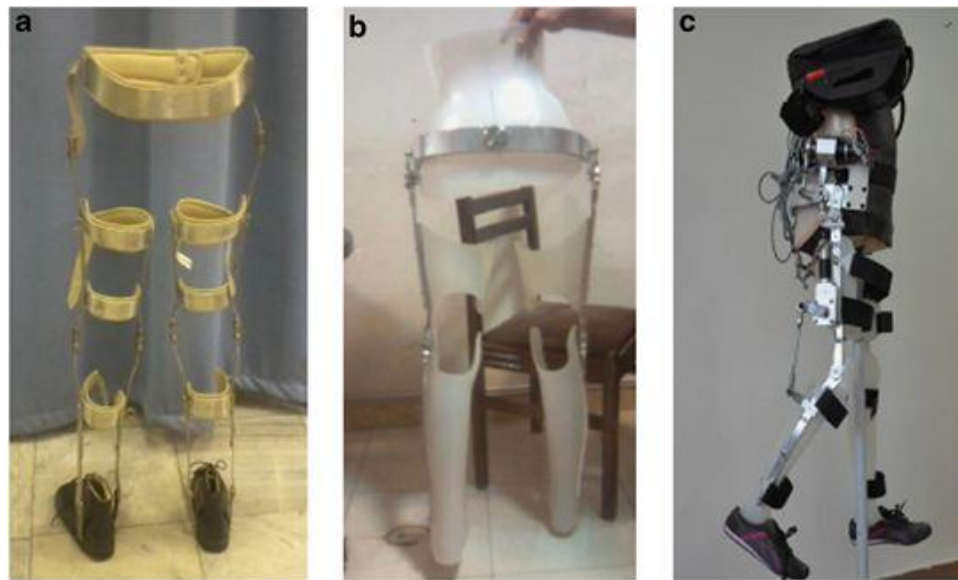


Рис. 1. Ортезні системи в реабілітації хворих з ХСМТ:  
а – НКАФО; b – RGO; c – PGO

Але основним недоліком цих пристроїв є високі енергетичні витрати під час їх застосування. Ходьба з ортезами НКАФО та RGO виснажує пацієнтів, що продемонстрували попередні дослідження, тому тренувальні сесії з їх використанням значно обмежені у часі, а велика кількість хворих з ХСМТ зрештою зовсім припиняють ними користуватися. Наприклад, відмова пацієнтів від використання ортезу RGO становить від 46% до 56%. Оскільки ефективність процесу фізичної реабілітації в значній мірі залежить від частоти та тривалості вправ, ці, вже традиційні ортопедичні технології, мають обмежений та недостатній вплив на процес відновлення функції ходьби та рухових можливостей, особливо на початковому етапі.

Кращою альтернативою зазначеним механічним ортезам, як засобу реабілітації та приладу для ходьби, є моторизовані ортези (Powered gait orthosis (PGO)) серед яких провідне місце займають роботизовані екзоскелети (PE) (рис. 1 c).

PE – це моторизовані індивідуально налаштовувані ортези з електроживленням, які розміщуються на паралізованих нижніх кінцівках людини з метою полегшення стояння, прогулянки, підйому сходами та виконання щоденних заходів.

Численні клінічні випробування неодноразово продемонстрували, що PE дуже ефективні для відновлення функції ходьби, безпечні для повсякденного використання, а також призводять до зменшення ризику виникнення вторинних медичних ускладнень. Два ключових дослідження порівнюють PE з механічними ортезами і визначають, що PE забезпечують більш швидку, більш ефективну та



стійку ходу, ніж механічні ортези ходьби при значно менших енергетичних витратах. [3;10] У рандомізованому контрольованому дослідженні Agazroug та співавторів, швидкість та пройдена відстань в 6-хвилинному тесті були більшими, а індекс фізіологічних витрат (Physiological Cost Index (PCI)) при цьому був на 50% меншим, при використанні PE ніж при використанні RGO та HKAFO [10] (див. табл. 1, табл. 2, рис. 2).

Таблиця 1

**Середнє значення  $\pm$  стандартне відхилення швидкості ходьби, пройденої відстані, PCI та їх порівняння під час ходьби з використанням механічних та моторизованих ортезів**

	Швидкість ходьби (м/хвилину)	Пройдена відстань (м)	Індекс фізіологічних витрат (уд/хв)
Ходьба з HKAFO	13.84 $\pm$ 1.85	90.20 $\pm$ 10.63	1.97 $\pm$ 0.17
Ходьба з RGO	15.28 $\pm$ 2.02	96.40 $\pm$ 13.35	1.93 $\pm$ 0.40
Ходьба з PGO	21.18 $\pm$ 1.75	120 $\pm$ 12.98	0.92 $\pm$ 0.25
<i>p</i> -значення	0.000	0.006	0.000

Таблиця 2

**Міжгрупове порівняння швидкості ходьби, пройденої відстані та PCI під час ходьби з використанням механічних та моторизованих ортезів**

	Швидкість ходьби (м/хвилину)	Пройдена відстань (м)	Індекс фізіологічних витрат (уд/хв)
Ходьба з HKAFO	0,748	+1,000	+1,000
Ходьба з RGO	0,000	0,008	0,000
Ходьба з PGO	0,001	0,032	0,000

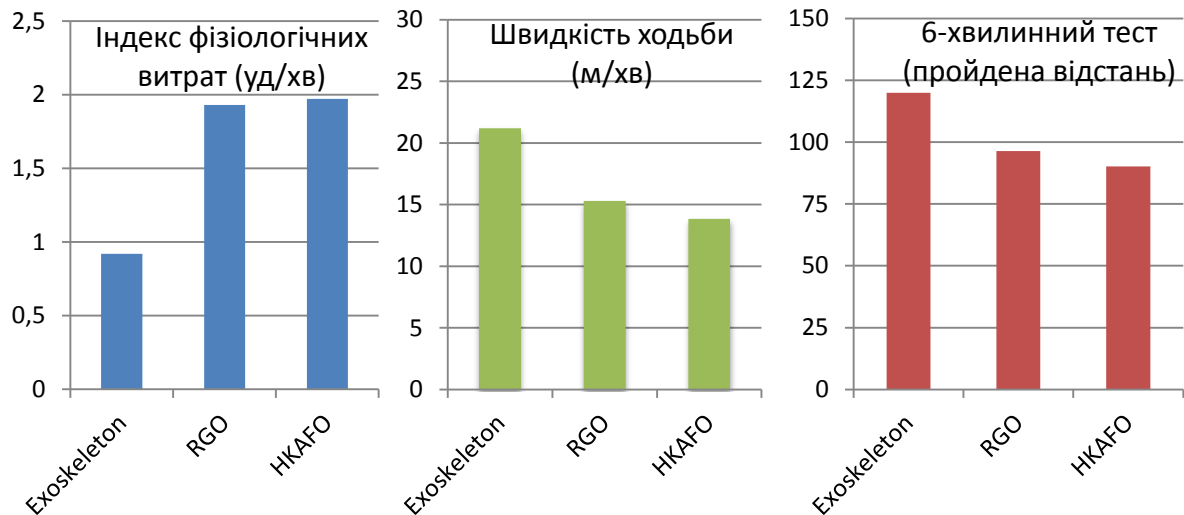


Рис. 2. Результати рандомізованого контрольованого дослідження, що порівнюють роботизовані екзоскелети, RGO, а також ортез HKAFO

Крім того, кілька досліджень підтверджують, що енергетичні витрати під час користування PE викликають кардіореспіраторну відповідь, подібну до такої, що спостерігається під час ходьби у людей за відсутності будь-яких патологій. Все це позитивно впливає на здоров'я та добробут [5;12;14;19;23]. Також дослідження використання PE у процесі реабілітації неодноразово демонстрували зменшення болю і спастичності [6;13;23;22;30], поліпшення функції кишечника та сечового



міхура [6;13;20;28;30;34], поліпшення загального стану здоров'я [18;26], зменшення потреби повторної госпіталізації та довгострокових витрати на охорону здоров'я [25].

На сьогоднішній день на ринку представлена вже велика кількість різноманітних РЕ. Але особливої уваги завдяки своїм функціональним можливостям заслуговує роботизований екзоскелет ReWalk, який першим у світі отримав від Управління продовольства й медикаментів США (англ. Food and Drug Administration, FDA) дозвіл на використання його в умовах клініки та дозвіл на особисте використання без нагляду медичного персоналу.

**Мета дослідження.** Провести аналіз існуючої літератури, визначити технічні характеристики та функціональні можливості роботизованого екзоскелету ReWalk. З'ясувати показання та протипоказання на призначення використання роботизованого екзоскелету ReWalk пацієнтам з ХСМТ. Визначити переваги та недоліки його застосування в процесі реабілітації хворих з ХСМТ.

**Матеріал та методи дослідження.** Проведено аналіз 35 джерел літератури з досліджень використання роботизованих екзоскелетів та екзоскелету ReWalk. Вивчено та проаналізовано результати та статистичні дані цих досліджень. Пошук літературних джерел, а саме рандомізованих або нерандомізованих контрольних досліджень, здійснювався у бібліографічних базах статей з медичних наук MEDLINE та EMBASE. Інформація щодо технічних даних та програмного забезпечення роботизованого екзоскелету ReWalk було отримано безпосередньо від виробника ReWalk Robotics, Марлбороб, штат Массачусетс, США. Деталі пошуку літератури в базах MEDLINE та EMBASE представлено в таблиці 3. Також, для пошуку додаткової інформації, здійснювався пошук за допомогою пошукової системи Google.

Таблиця 3

### Стратегія пошуку в бібліографічних базах статей з медичних наук MEDLINE та EMBASE

#### Діагностичні терміни в пошуку

1. Параліч (Paralysis)
2. Хребетно-спинномозкова травма (Spinal cord injury)
3. Параплегія (Paraplegi)
4. ХСМТ (SCI)

#### Терапевтичні терміни в пошуку

5. ReWalk
6. Exoskeleton
7. Ekso
8. eLegs
9. Powered
10. Argo
11. Indego
12. Mina
13. Mindwalker
14. Bionic
15. H2
16. REX
17. Robot\*
18. WPAL

#### Комбінації термінів в пошуку

19. or/1–4
20. or/5–18
21. and/19–20



**Результати дослідження та їх обговорення.** ReWalk – це роботизований екзоскелет, який забезпечує підтримку нижньої частини тулуба та автоматизовані пасивні рухи в тазостегновому та колінному суглобах, що дає можливість хворим з наслідками ХСМТ з мінімальними зусиллями переходити у вертикальне положення, ходити, виконувати розвороти, підніматися та спускатися сходами.

ReWalk складається з: металевих шин з шарнірами, які охоплюють кульшовий, колінний, гомілковостопний суглоби та стопу; частини, яка підтримує поперековий відділ хребта; комп'ютеризованої системи контролю та бездротового пульта дистанційного керування, що розміщується на зап'ясті користувача. На відміну від механічних ортезів, кульшові та колінні з'єднання екзоскелету ReWalk є моторизованими та приводяться в дію за рахунок електроживлення від батареї (рис. 3) [9;21].



Рис. 3. Компоненти екзоскелету ReWalk

Акт ходьби в зазначеному РЕ ініціюється незначним нахилом тулуба вперед та зміною положення центра тяжіння, яке сприймається сенсором, що розташовується на тулубній частині екзоскелету ReWalk. Алгоритм програмного забезпечення аналізує вхідний сигнал датчика і генерує попередньо встановлені поперемінні рухи у моторизованих з'єднаннях стегна та коліна шин екзоскелету, що призводять до кроків. Під час ходьби в ReWalk для забезпечення рівноваги користувача використовуються милиці [14].

Два варіанти пристрою ReWalk є комерційно доступними: регульована модель ReWalk Rehabilitation, призначена для використання під час відновлюваного лікування декількома користувачами в умовах реабілітаційних клінік та індивідуальна версія Rewalk Personal 6.0 для персонального використання в повсякденному житті (рис. 4) [21].

У США ReWalk схвалений для застосування особами з ХСМТ з рівнем пошкодження спинного мозку на рівнях від Т7 (сьомий грудний хребець) до L5 (п'ятий поперековий хребець). Даний РЕ також може використовуватися в реабілітації травм спинного мозку вищого рівня (Т4–Т6) (табл.4) [21].





Таблиця 4

**Схвалення до застосування екзоскелету ReWalk Управлінням продовольства і медикаментів США виходячи з рівня пошкодження спинного мозку**

Статус схвалення застосування екзоскелету ReWalk	Рівень пошкодження спинного мозку
Не схвалений	C7
	C8
	T1
	T2
	T3
Схвалений до застосування в умовах клініки під наглядом медичного персоналу	T4
	T5
	T6
Схвалений до індивідуального використання	T7
	T8
	T9
	T10
	T11
	T12
	L1

Примітка: C – cervical – шийний відділ хребта, L – lumbar – поперековий відділ хребта, T – thoracic – грудний відділ хребта.



Рис. 4. Версії екзоскелету ReWalk: а – Rewalk Personal 6.0; б – ReWalk Rehabilitation

Для ходьби у апараті ReWalk користувач повинен мати збережені або достатньо відновленні функції верхніх кінцівок. Протипоказаннями до призначення застосування приладу є:

- значний ступінь спастичності (4 та 5 балів за Модифікованою шкалою оцінки спастичності Ешворта);
- значні контрактури;
- нестабільність хребта;
- незрошені переломи;



- суттєві порушення функцій верхніх кінцівок;
- пролежні.

Такі фактори, як гострі респіраторні захворювання, різноманітні інфекції, проблеми зі сторони серцево-судинної системи, підвищений артеріальний тиск також виключають використання пристрою [35].

Підбір розміру та налаштувань програмного забезпечення екзоскелету ReWalk здійснюється індивідуально, окремо для кожного користувача. Визначаючи розмір апарату, виконуються виміри довжини стегна користувача (від великого вертлюга до центра суглобової щілини колінного суглоба), довжини гомілки (центра суглобової щілини колінного суглоба до бічної кісточки малогомілкової кістки) та відстань від гомілковостопного суглоба до п'ятки. За допомогою програмного забезпечення встановлюють амплітуду рухів у тазостегновому та колінному суглобах, швидкість ходьби та потужність рухів екзоскелету.

Після налаштувань, користувач за допомогою сертифікованого тренера проходить навчання з використання апарату. На перших сесіях тренувального процесу вивчаються навички переходу с положення сидячи у положення стоячи та навпаки, навички стояння та переносу ваги тіла вперед, назад та із сторони в сторону. Після освоєння цих рухових актів приступають до опанування ходьби в екзоскелеті, вивчаючи ходьбу по прямій, повороти, підйом та спуск сходами.

Аналіз проведених досліджень використання ReWalk в реабілітації хворих з ХСМТ показує ефективність застосування зазначеного засобу (див. табл. 5 та 6).

Таблиця 5

**Базова характеристика пацієнта**

Дослідження	N	Чоловіки (n)	Вік (років)	Зріст (см)	Вага (кг)	Рівень ураження	AIS*			Час після травми (рік)
							A	B	C	
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
Asselin et al <sup>22</sup>	8	7	46	–	78	N1-N11	7	1	0	5.9
Benson et al <sup>23</sup>	10	10	32	–	–	C7-L1	7	0	3	4.8
Esquenazi et al <sup>24</sup>	12	8	38	177	74	T3-T12	–	–	–	7.4
Fineberg et al <sup>26</sup>	6	5	45	174	71	T1-T11	5	1	0	6.3
Spungen et al <sup>31</sup>	7	6	44	175	73	T1-T11	5	2	0	5.6
Talaty et al <sup>32</sup>	12	–	–	–	–	C7–T12	–	–	–	–
Yang et al <sup>33</sup>	12	10	46	173	75	C8-T11	9	2	1	6.8
Zeilig et al <sup>34</sup>	6	6	33	–	–	T5-T12	–	–	–	5.0

Примітки: \* AIS, American Spinal Injury Association Impairment Scale - Шкала пошкодження спинного мозку Американської асоціації спинальної травми.



Таблиця 6

Протоколи програм тренувань з використанням екзоскелету ReWalk

Дослідження	Умови тренування					Обсяг тренування			
	Ходьба в приміщенні	Ходьба на вулиці	Ходьба з перешкодами	Ходьба сходами	Побутові дії	Кількість занять	Тривалість занять (хв.)	Занять в тиждень	Тривалість програми (тижні)
1	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Asselin et al <sup>22</sup>	X					37	75	3	12
Benson et al <sup>23</sup>	X	X	X	X	X	20	120	2	10
Esquenazi et al <sup>24</sup>	X					24	83	3	8
Fineberg et al <sup>26</sup>	X					72	90	3	24
Spungen et al <sup>31</sup>	X	X	X	X	X	45	90	3	15
Talaty et al <sup>32</sup>	X					24	75	3	8
Yang et al <sup>33</sup>	X					55	90	–	–
Zeilig et al <sup>34</sup>	X					14	50	–	–

Так, у досліді проведеному Esquenazi з співавт., 12 хворих з ХСМТ (8 чоловіків, 4 жінки; середній вік – 38 років; середній зріст – 177 см; середня вага – 74 кг) після 8-недільної програми тренувань мали змогу самостійно використовувати РЕ та ходити за допомогою цього засобу без будь-якої сторонньої допомоги щонайменше 50-100 метрів зі середньою швидкістю 0,25 м/с. У більшості пацієнтів відмічалось поліпшення функцій органів малого тазу, зменшення болі та спастичності в нижніх кінцівках [13].

За даними Fineberg з співавт., у 9 осіб (7 чоловіків та 2 жінки; віком від 24 до 61 року), які брали участь у дослідженні, після 24-недільної програми тренувань, показники біомеханічного аналізу самостійної ходи у РЕ (пікове середнє значення позиції (Peak stance average), вертикальна сила реакції на ґрунт (Vertical Ground Reaction Force)), виконаного за допомогою F-Scan сенсорів, були наближені до таких, що спостерігаються під час ходьби здорових осіб (рис. 5). Середня швидкість ходьби склала 0,61 м/с [16].



Рис. 5. Проведення біомеханічного дослідження ходьби у ReWalk за допомогою F-Scan сенсорів:  
 А – користувач ReWalk;  
 В – F-Scan сенсори вбудовані в систему ReWalk;  
 С – Підшовний; F-Scan сенсори тиску





Дослідження Asselin з співавт., показує, що у 8 осіб (7 чоловіків, 1 жінка; середній вік – 46 років, середня вага – 78 кг) після 12-недільного курсу занять енергетичні витрати під час ходьби у ReWalk та реакція з боку кардіореспіраторної системи були наближені до таких, що спостерігаються під час ходьби у осіб без функціональних обмежень. Автори дослідження дійшли висновку, що даний екзоскелет є безпечним у використанні та може бути рекомендований до застосування як для тренувань, так і в побуті [5].

Після 10-недільної програми тренувань в дослідженні, проведеного Benson з співавт., в усіх учасниках, які використовували ReWalk, показники швидкості ходьби та пройденої дистанції були значно вищими порівняно з тими учасниками, в реабілітаційному процесі яких не застосовувався PE [7].

Дослідження Sprungen з співавт., в додаток до демонстрації поліпшення показників ходьби, показало значне розширення побутових можливостей осіб, які використовували екзоскелет в домашніх умовах. Ходьба по сходинках та килимовому покриттю, дістанання речей з верхніх шухляд меблів, приготування їжі на кухонному столі стали можливими з ReWalk. Також користувачі зазначеного PE отримали можливість безперешкодно пересуватися в умовах вулиці без створення перешкод для пішоходів та інших учасників дорожнього руху [28;29].

Дослідження Yang A з співавт., також довело безпечність використання ReWalk хворими з ХСМТ в умовах клініки та вдома. 7 з 12 (10 чоловіків, 2 жінки; середній вік – 46 років, середній зріст – 173; середня вага – 75 кг;) учасників дослідження після проходження курсу навчання використанню PE ходили зі середньою швидкістю  $\geq 0.40$  м/с, що є достатньою для ходьби по вулиці в потоку пішоходів. Автори повідомляють про випадки виникнення легкої потертості шкіри після використання ReWalk, але визначають їх, як незначні та такими, що швидко загоюються [33].

Під час кінематичного аналізу ходьби з використанням екзоскелету ReWalk Talaty з співавт., дійшли висновку, що хода в цьому PE є принципово симетричною. Результати дослідження також доводять, що патерн ходи під час використання ReWalk більше наближений до природнього, ніж під час використання інших допоміжних засобів для ходьби [32].

Дослідження Zeilig з співавт., ще раз підтвердили безпечність використання ReWalk. Використання екзоскелету добре переносилося досліджуваними, без збільшення болю та спастики в нижніх кінцівках, з виникненням помірного рівня втоми [34].

Єдиним недоліком усіх PE та екзоскелету ReWalk є їх висока ціна (70000 – 100000 доларів США). Але такі витрати можуть бути компенсовані заощадженнями можливих витрат, пов'язаними з профілактикою різноманітних ускладнень у хворих з ХСМТ, що в кінцевому рахунку може призвести до загальної економії в системі охорони здоров'я [24].

**Висновки.** Роботизований екзоскелет ReWalk – це новітній, безпечний засіб реабілітації та пересування хворих з хребтно-спинномозковою травмою, який дозволяє їм вільно сидіти, стояти, ходити та переходити з одного зазначеного положення в інше. Цей прилад дає можливість користувачам без особливих зусиль долати такі перешкоди як бордюри та сходинки, пересуватися по поверхні з різних матеріалів. Це перший екзоскелет, який є доступним для використання в умовах клініки під наглядом медичного персоналу та самостійно в умовах побуту без будь-якої допомоги. Легкість та безпечність використання ReWalk досягається завдяки міцній конструкції, підбору персонального розміру апарату та індивідуальних налаштувань в системі програмного забезпечення. Наявність таких протипоказань, як значний ступінь спастичності, значні контрактури, нестабільність хребта, незрощені переломи, суттєві порушення функцій верхніх кінцівок, пролежні



виключає застосування цього екзоскелету.

Дослідження застосування ReWalk в процесі відновлення та адаптації хворих з ХСМТ до нових умов життя показують його численні переваги над механічними ортезами та іншими відомими засобами: значно менші енергетичні витрати при використанні, більш природній патерн ходи, більший обсяг рухових можливостей та виконання повсякденних побутових дій, більший ступінь незалежності від сторонньої допомоги, значно вища ефективність його застосування для відновлення функції ходьби.

### **Список використаної літератури**

- Обласний інформаційно-аналітичний центр медичної статистики. Показники здоров'я населення та діяльності закладів охорони здоров'я Дніпропетровської області за I квартал 2011 року. Дніпропетровськ, 2011. 137 с.
- Педаченко Є.Г., Іпатов А.В., Тарасенко О.М. Статистичний аналіз інвалідності при травмі хребта та спинного мозку. Оригінальные исследования : Запорожский медицинский журнал. № 6 (75), 2012. С. 21-23.
- Arazpour M, Bani M, Hutchins S, Jones R. The physiological cost index of walking with mechanical and powered gait orthosis in patients with SCI. *Spinal Cord*. 2013;51(5):356-9.
- Arem H, Moore SC, Patel A, et al. Leisure time physical activity and mortality: a detailed pooled analysis of the dose-response relationship. *JAMA Intern Med*. 2015;175(6):959–967
- Asselin P, Knezevic S, Kornfeld S, Cirnigliaro C, Agranova-Breyter I, Bauman W, et al. Heart rate and oxygen demand of powered exoskeleton-assisted walking in persons with paraplegia. *J Rehabil Res Dev*. 2015;52(2):147-58.
- Bach Baunsgaard C, Nissen U, Brust A, Frotzler A, Ribeill C, Kalke Y, et al. Exoskeleton gait training after spinal cord injury: An exploratory study on secondary health conditions. *J Rehabil Med*. 2018.
- Benson I, Hart K, Tussler D, van Middendorp JJ. Lower-limb exoskeletons for individuals with chronic spinal cord injury: findings from a feasibility study. *Clin Rehabil*. 2016;30(1):73–84.
- Bernardi M, Canale I, Castellano V, Di Filippo L, Felici F, Marchetti M. The efficiency of walking of paraplegic patients using a reciprocating gait orthosis. *Paraplegia*. 1995;33(7):409–415.
- Boninger M, French J, Abbas J, Nagy L, Ferguson-Pell M, Taylor SJ, et al. Technology for mobility in SCI 10 years from now. *Spinal Cord*. 2012;50(5):358-63
- Chen S, Li J, Shuai M, Wang Z, Jia Z, Huang X, et al. First multicenter clinical trial of China's domestically designed powered exoskeleton-assisted walking in patients with paraplegia. *Ann Phys Rehabil Med*. 2018;61:e495.
- Ditunno PL, Patrick M, Stineman M, Ditunno JF. Who wants to walk? Preferences for recovery after SCI: a longitudinal and cross-sectional study. *Spinal Cord*. 2008;46(7):500-6.
- Escalona M, Brosseau R, Vermette M, Comtois A, Duclos C, Aubertin-Leheudre M, et al. Cardiorespiratory demand and rate of perceived exertion during overground walking with a robotic exoskeleton in long-term manual wheelchair users with chronic spinal cord injury: A cross-sectional study. *Ann Phys Rehabil Med*. 2018;61(4):215-23.



- Esquenazi A, Talaty M, Packel A, Saulino M. The ReWalk powered exoskeleton to restore ambulatory function to individuals with thoracic-level motor-complete spinal cord injury. *Am J Phys Med Rehabil.* 2012;91(11):911-21.
- Esquenazi A. New bipedal locomotion option for individuals with thoracic level motor complete spinal cord injury. *Journal of the Spinal Research Foundation.* 2013;8(1):26-8.
- Evans N, Hartigan C, Kandilakis C, Pharo E, Clesson I. Acute Cardiorespiratory and Metabolic Responses During Exoskeleton-Assisted Walking Overground Among Persons with Chronic Spinal Cord Injury. *Top Spinal Cord Inj Rehabil.* 2015;21(2):122-32.
- Fineberg DB, Asselin P, Harel NY, et al. Vertical ground reaction force based analysis of powered exoskeleton-assisted walking in persons with motor-complete paraplegia. *J Spinal Cord Med.* 2013;36(4): 313–321.
- Franceschini M, Baratta S, Zampolini M, Loria D, Lotta S. Reciprocating gait orthoses: a multicenter study of their use by spinal cord injured patients. *Arch Phys Med Rehabil.* 1997;78(6):582–586.
- Gagnon D, Vermette M, Duclos C, Aubertin-Leheudre M, Ahmed S, Kairy D. Satisfaction and perceptions of long-term manual wheelchair users with a spinal cord injury upon completion of a locomotor training program with an overground robotic exoskeleton. *Disabil Rehabil Assist Technol.* 2017:1-8.
- Gorgey A, Wade R, Sumrell R, Villadelgado L, Khalil R, Lavis T. Exoskeleton Training May Improve Level of Physical Activity After Spinal Cord Injury: A Case Series. *Top Spinal Cord Inj Rehabil.* 2017;23(3):245-55.
- Hong E, editor Patient-reported bladder management improvements after exoskeletal-assisted walking. *ASCIP;* 2017.
- James Murtagh, BBA, MHA, FACHE. ReWalk: Robotic Exoskeletons for Spinal Cord Injury. *Cadth issues in emerging health technologies informing decisions about new health technologies. № 141, 2015. P. 2-11.*
- Juszczak M, Gallo E, Bushnick T. Examining the Effects of a Powered Exoskeleton on Quality of Life and Secondary Impairments in People Living with Spinal Cord Injury. *Topics in Spinal Cord Injury Rehabilitation.* 2018.
- Kressler J, Thomas C, Field-Fote E, Sanchez J, Widerstrom-Noga E, Cilien D, et al. Understanding therapeutic benefits of overground bionic ambulation: exploratory case series in persons with chronic, complete spinal cord injury. *Arch Phys Med Rehabil.* 2014;95(10):1878-87 e4.
- Miller L, Zimmerman A, Herbert W. Clinical effectiveness and safety of powered exoskeleton assisted walking in patients with SCI: systematic review with meta-analysis. *Medical Devices: Evidence and Research.* 2016;9:1-12.
- Morrison S, Lorenz D, Eskay C, Forrest G, Basso D. Longitudinal Recovery and Reduced Costs After 120 Sessions of Locomotor Training for Motor Incomplete Spinal Cord Injury. *Arch Phys Med Rehabil.* 2018;99(3):555-62.
- Raab K, Krakow K, Tripp F, Jung M. Effects of training with the ReWalk exoskeleton on quality of life in incomplete spinal cord injury: a single case study. *Spinal Cord Ser Cases.* 2016;2:15025.
- Scivoletto G, Petrelli A, Lucente LD, et al. One year follow up of spinal cord injury patients using a reciprocating gait orthosis: preliminary report. *Spinal Cord.* 2000;38(9):555–558.
- Spungen A, editor Spinal Cord Injury and Exoskeleton-Assisted Walking. *AAPM&R;* 2014.
- Spungen AM, Asselin PK, Fineberg DB, Kornfeld SD, Harel NY. Exoskeletal-assisted walking for persons with motor-complete paraplegia. Paper presented at: NATO Science and Technology Organization; Milan, Italy; April 15–17, 2013.



- Stampacchia G, Rustici A, Bigazzi S, Gerini A, Tombini T, Mazzoleni S. Walking with a powered robotic exoskeleton: Subjective experience, spasticity and pain in spinal cord injured persons. *NeuroRehabilitation*. 2016;39(2):277-83.
- Sykes L, Edwards J, Powell ES, Ross ER. The reciprocating gait orthosis: long-term usage patterns. *Arch Phys Med Rehabil*. 1995; 76(8):779–783.
- Talaty M, Esquenazi A, Briceno JE. Differentiating ability in users of the ReWalk(TM) powered exoskeleton: an analysis of walking kinematics. *IEEE Int Conf Rehabil Robot*. 2013;2013:6650469.
- Yang A, Asselin P, Knezevic S, Kornfeld S, Spungen AM. Assessment of in hospital walking velocity and level of assistance in a powered exoskeleton in persons with spinal cord injury. *Top Spinal Cord Inj Rehabil*. 2015;21(2):100–109.
- Zeilig G, Weingarden H, Zwecker M, Dudkiewicz I, Bloch A, Esquenazi A. Safety and tolerance of the ReWalk exoskeleton suit for ambulation by people with complete spinal cord injury: a pilot study. *J Spinal Cord Med*. 2012;35(2):96-101.
- ReWalk. More Than Walking. Retrieved from <https://rewalk.com/faqs/>.

---

### ***Відомості про авторів***

---

***Федяй Олександр***, викладач кафедри фізичної терапії. Харківська державна академія фізичної культури

***Федяй Ірина Олександрівна***, старший викладач кафедри фізичної терапії. Харківська державна академія фізичної культури

**E-mail:** razira1983@gmail.com