УДК 614.84

БІОМЕХАНІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ РУХУ ОСІБ ІЗ ДВОСТОРОННІМИ ПРОТЕЗАМИ НИЖНІХ КІНЦІВОК ПІД ЧАС ЕВАКУАЦІЇ В УМОВАХ ПОЖЕЖІ

https://doi.org/10.33269/nvcz.2025.1.(19).120-128

Хлевной О. В.[1], ORCID iD 0000-0003-2846-3480
Жезло-Хлевна Н. В.[1], ORCID iD 0009-0005-3768-2863
Доценко О. Г.[2], ORCID iD 0000-0001-7437-8733
Борисова А. С.[2], ORCID iD 0000-0002-8700-0761
Калиновський А. Я.[3], ORCID iD 0000-0002-1021-5799
*E-mail: mio1488@yahoo.com

[1]Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, Україна
[2]Інститут наукових досліджень з цивільного захисту НУЦЗ України, Україна
[3]Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту, Україна

ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції: 30.04.2025
Пройшла рецензування: 12.05.2025

КЛЮЧОВІ СЛОВА:

двосторонні ампутації, модульні протези, біонічні протези, енерговитрати, швидкість евакуації, транстібіальні ампутації, трансфеморальні ампутації, пожежна безпека

АНОТАЦІЯ

У статті проаналізовано, що модульні протези забезпечують швидкість 25-50% від доампутаційної на горизонтальних ділянках (0,4-0,8 м/с) і 10-30% на сходах (0,15-0,4 м/с), тоді як для біонічних характерними є кращі показники до 40-70% (0,7-1,2 м/с) і 20-45% (0,25-0,6 м/с) відповідно. Енерговитрати зростають на 5-10% на кожен кілограм ваги протеза, досягаючи +40-60% для транстібіальних і +100-120% для трансфеморальних ампутацій. На основі даних створено графічні залежності енерговитрат від ваги протезів і порівняння швидкості евакуації, що підтверджують значний вплив типу протеза та рівня ампутації. Результати вказують на необхідність адаптації наявних методик розрахунку тривалості евакуації для врахування зниженої швидкості та високої втомлюваності (дистанція до 50-100 м) осіб з двосторонніми протезами нижніх кінцівок.

Наукова новизна полягає у комплексному аналізі біомеханічних характеристик двосторонніх протезів у контексті евакуації, що вперше проведено для українських реалій з урахуванням воєнного контексту. Встановлено кількісні показники швидкості та енерговитрат, які можуть слугувати основою для оновлення чинних нормативних документів. Практична цінність роботи полягає у наданні даних для розробки інклюзивних евакуаційних стратегій, що враховують потреби осіб із обмеженою мобільністю, зокрема в умовах надзвичайних ситуацій.

Постановка проблеми. Повномасштабна війна в Україні призвела до значного зростання кількості осіб із ампутаціями кінцівок, включаючи військових, цивільних і дітей. За оцінками The Wall Street Journal, станом на липень 2023 року кількість українців із втратою верхніх або нижніх кінцівок сягала приблизно 50 тисяч. Дані Міністерства соціальної політики України свідчать, що до червня 2023 року по реабілітаційні засоби звернулися 58 852 особи, із яких 20737 отримали протези [1]. У період із січня до травня 2024 року протезами верхніх і нижніх кінцівок було забезпечено 5 248 осіб, причому протези нижніх кінцівок становили понад 55% від загальної кількості [2]. Таким чином, щорічний приріст осіб, які потребують протезування, становить приблизно 10 тисяч, і ця тенденція зберігатиметься після припинення активних бойових дій, оскільки проміжок часу між травмою та протезуванням триває, як правило, кілька місяців.

Оскільки точних даних про двосторонні ампутації нижніх кінцівок немає, можна зробити приблизну оцінку. У контексті воєнних травм частка двосторонніх ампутацій нижніх кінцівок зазвичай становить 10-15% від загальної кількості ампутацій нижніх кінцівок, залежно від характеру травм (наприклад, вибухові ураження) [3]. Виходячи з того, що протези нижніх кінцівок складають 55% від усіх протезів (приблизно 28 600 осіб із 52 000 до 2024 року), кількість двосторонніх ампутацій нижніх кінцівок імовірно склала 3000–5000 осіб і продовжує збільшуватися щонайменше на 500 щороку. Ця оцінка є приблизною, оскільки залежить від типу травм і доступності медичних даних.

Евакуація людей під час пожежі є критично важливим процесом, що вимагає швидкого та безпечного переміщення осіб із зони небезпеки. Виходячи із наведених вище даних, виникає потреба в адаптації підходів до організації евакуаційних заходів. Біомеханічні особливості руху таких осіб, включно з підвищеним ризиком втрати рівноваги, зниженою координацією, високими енерговитратами та чутливістю до екстремальних умов, суттєво ускладнюють їхню евакуацію порівняно з людьми без ампутацій. Водночас сучасні нормативні документи та наукові дослідження з евакуації при пожежі недостатньо враховують специфіку осіб з двосторонніми протезами, що створює прогалини в розумінні їхньої поведінки та потреб у таких ситуаціях.

Відсутність систематизованих даних про вплив біомеханічних обмежень на швидкість і безпеку евакуації осіб із двосторонніми протезами нижніх кінцівок ускладнює розробку ефективних стратегій забезпечення їхньої безпеки. Це питання набуває особливої актуальності в контексті соціальної інклюзії та захисту прав людей з інвалідністю, адже забезпечення рівних можливостей для евакуації є невід'ємною частиною створення безпечного середовища. Таким чином, виникає необхідність теоретичного аналізу біомеханічних особливостей руху таких осіб у стресових умовах пожежі, що дозволить виявити ключові виклики та сформулювати рекомендації для подальших досліджень і практичних рішень.

Дослідження біомеханічних особливостей руху осіб із двосторонніми протезами нижніх кінцівок під час евакуації має прямий зв'язок із низкою важливих наукових і практичних завдань. З наукової точки зору, воно сприяє поглибленню розуміння біомеханіки руху в екстремальних умовах, заповнюючи прогалину в літературі щодо евакуаційної поведінки осіб із двосторонніми ампутаціями. Це створює основу для розробки теоретичних моделей евакуації, які враховують унікальні фізіологічні та технічні характеристики такої категорії людей. З огляду на практичну складову, результати дослідження можуть бути використані для вдосконалення будівельних норм і стандартів, що регулюють доступність і безпеку евакуаційних шляхів, а також для розробки спеціалізованих протоколів евакуації в закладах із високим рівнем відвідуваності. Крім того, дослідження сприятиме підвищенню готовності служб порятунку до роботи з особами з інвалідністю, що є важливим елементом забезпечення безпеки в умовах надзвичайних ситуацій. Таким чином, вирішення цієї проблеми має значення для вдосконалення систем протипожежного захисту та реалізації принципів інклюзивного суспільства.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Біомеханіка руху осіб із двосторонніми протезами нижніх кінцівок у контексті евакуації при пожежі є відносно новою та недостатньо розвинутою темою, що обумовлено обмеженою кількістю спеціалізованих праць, які б безпосередньо розглядали цей специфічний сценарій. Натомість сучасна наукова література зосереджується переважно на загальних аспектах біомеханіки протезування, реабілітації та адаптації осіб з ампутаціями до повсякденного життя, що дозволяє

частково екстраполювати дані на умови евакуації.

Значна частина досліджень присвячена біомеханіці ходи осіб із двосторонніми протезами. Наприклад, у роботі [4] встановлено, що пересування з двосторонніми транстібіальними протезами підвищує енерговитрати на 40-60% порівняно з нормою, а для трансфеморальних ампутацій цей показник може досягати 100-120%. Такі дані свідчать про швидку втому осіб із двома протезами, що може критично впливати на їхню здатність тривало пересуватися в умовах евакуації, де час і фізична витривалість є ключовими. У роботі [5] додатково зазначено, що сучасні біонічні протези підвищують швидкість ходи до 1.5 м/с на горизонтальних поверхнях порівняно з 0,8-1,2 м/с для механічних аналогів, однак їхня ефективність знижується на складних траєкторіях, таких як сходи, де швидкість падає до 0,2-0,4 м/с. Ці показники вказують на потенційні труднощі при подоланні архітектурних бар'єрів під час евакуації.

Окремі дослідження, зокрема [6], акцентують увагу на проблемах балансу та стабільності. Особи з двосторонніми протезами мають на 30-50% вищий ризик втрати рівноваги, а час відновлення стабільності після зовнішнього впливу (наприклад, поштовху) становить 2-3 секунди проти 1 секунди в умовно здорових осіб. У контексті евакуації, де можливі контакти з натовпом або пересування нерівними поверхнями, це створює додаткові ризики травматизації. У дослідженні [7] проаналізовано зниження координації руху у осіб із двома протезами, особливо під час зміни напрямку чи спуску сходами, що може уповільнювати евакуацію до 0,3-0,5 м/с порівняно з 1-1,5 м/с для осіб без ампутацій.

Попри наявність таких даних, література з евакуації при пожежі рідко розглядає осіб із двосторонніми протезами як окрему групу. Стандарти протипожежної безпеки, такі як українські ДСТУ та ДБН [9, 10] зосереджуються на загальних рекомендаціях для осіб з інвалідністю, ігноруючи специфіку біомеханічних обмежень осіб з протезами. Деякі роботи з моделювання евакуації [11, 12] вказують на необхідність урахування різної швидкості руху в гетерогенних групах, але не надають конкретних даних для осіб із протезами. Це створює прогалину в розумінні того, як такі особи взаємодіють із евакуаційним середовищем, зокрема в умовах задимлення, спеки чи обмеженої видимості.

Додатковий інтерес викликають дослідження впливу екстремальних умов на ефективність протезів. Наприклад, є дані [13] про зниження зчеплення протезів на вологих поверхнях на 20-30%, що може бути актуальним для евакуації через зони дії систем пожежогасіння. Високі температури (понад 40°C), характерні для пожежі, також здатні знижувати ефективність протезів на 10% через деформацію матеріалів, що частково висвітлено в технічних звітах компаній-виробників.

Водночас сучасні публікації з реабілітації та протезування [8] наголошують на потенціалі тренувальних програм для підвищення мобільності осіб із двома протезами, що може бути перспективним для підготовки до евакуаційних сценаріїв. Проте такі програми рідко враховують стресові фактори, що є типовими для пожежі. Це вказує на необхідність інтеграції даних із біомеханіки, психології та проведення натурних експериментальних досліджень із моделювання надзвичайних ситуацій для створення цілісної картини.

Таким чином, аналіз літератури засвідчує, що хоча окремі аспекти біомеханіки руху осіб із двосторонніми протезами добре вивчені в контексті повсякденної активності, їхня поведінка в умовах евакуації при пожежі залишається недослідженою. Основними невирішеними питаннями є кількісна оцінка впливу стресових умов на швидкість і безпеку евакуації, взаємодія осіб із двома протезами з архітектурними бар'єрами в реальних сценаріях, а також розробка

адаптованих протоколів евакуації. Ці прогалини підкреслюють актуальність подальших досліджень, які б поєднували біомеханічний аналіз із практичними аспектами протипожежної безпеки.

Методи дослідження. Дослідження має теоретичний характер і спрямоване на систематизацію та аналіз наукових даних про біомеханіку руху осіб із двосторонніми протезами нижніх кінцівок під час евакуації при пожежі. Основним методом є літературний огляд, який передбачає пошук, відбір і критичний аналіз публікацій, що стосуються біомеханіки руху, протезування та евакуаційних процесів.

У рамках дослідження виконано систематичний пошук у міжнародних наукових базах даних, зокрема PubMed, Google Scholar і ResearchGate, за ключовими словами: "bilateral lower limb prosthesis", "biomechanics of gait", "prosthetic mobility", "evacuation behavior" і "fire evacuation". Додатково проаналізовано нормативні документи, такі як ДБН, ДСТУ [9, 10], для оцінки їхньої відповідності потребам осіб із двосторонніми протезами. Аналіз стосувався статей, які містять кількісні дані про енерговитрати, швидкість руху, стабільність і координацію осіб із двосторонніми протезами, а також робіт, присвячених проблемам евакуації осіб із зниженою мобільністю.

Якісний аналіз відібраних даних був зосереджений на виявленні прогалин у сучасних дослідженнях, зокрема щодо евакуації осіб із двома протезами в умовах стресу, задимлення чи архітектурних бар'єрів. Кількісний аналіз передбачав систематизацію біомеханічних показників, таких як швидкість ходи, енерговитрати, час стабілізації балансу та швидкість спуску сходами. Дані було узагальнено та порівняно з характеристиками осіб без ампутацій.

На основі отриманих даних було сформовано узагальнену модель біомеханічних обмежень, яка враховує вплив балансу, координації, енерговитрат, рівня ампутації і типу протезів на евакуаційну поведінку. Модель адаптовано до умов пожежі, включаючи такі фактори, як зниження зчеплення протезів на вологих поверхнях та вплив високих температур.

Дослідження не включає емпіричних експериментів через відсутність доступу до учасників із двосторонніми протезами та складність відтворення реальних умов пожежі. Аналіз базується на екстраполяції даних із повсякденних сценаріїв руху, що може частково обмежувати точність прогнозів для стресових умов.

Цей методологічний підхід дозволяє систематизувати наявні знання, виявити ключові біомеханічні виклики та сформулювати гіпотези для подальших емпіричних досліджень, спрямованих на підвищення безпеки евакуації осіб із двосторонніми протезами нижніх кінцівок.

Формулювання цілей дослідження. Мета роботи – систематизувати та проаналізувати біомеханічні особливості руху осіб із двосторонніми протезами нижніх кінцівок в контексті евакуації при пожежі для виявлення ключових обмежень і формування теоретичної основи для розробки ефективних евакуаційних стратегій.

Задля досягнення мети необхідно вирішити низку завдань дослідження:

- провести огляд наукової літератури з біомеханіки ходи, енерговитрат, стабільності та координації осіб із двосторонніми протезами, узагальнивши кількісні показники (швидкість руху, час стабілізації балансу) для оцінки їхнього впливу на евакуаційну поведінку.
- визначити біомеханічні виклики евакуації при пожежі, включаючи вплив типу протезів (механічних і біонічних), рівня ампутації, стресових умов (задимлення, температура, вологість) і архітектурних бар'єрів на швидкість і безпеку руху.
- виявити прогалини в сучасних дослідженнях і нормативних підходах до

евакуації осіб із двосторонніми протезами та сформулювати напрями для подальших наукових і практичних розробок.

Виклад основного матеріалу дослідження. Особи з двосторонніми протезами нижніх кінцівок стикаються з суттєвими біомеханічними обмеженнями, які впливають на їхню здатність до швидкої та безпечної евакуації. Одним із основних факторів є порушення балансу та стабільності. Через відсутність природних пропріоцептивних сигналів ризик втрати рівноваги і падіння зростає на 30-50% порівняно з особами із односторонніми протезами. Час відновлення стабільності після зовнішнього впливу, наприклад, поштовху в натовпі, становить 2-3 секунди проти 1 секунди у осіб без ампутацій. Умови евакуації, такі як нерівні поверхні чи сходи, додатково ускладнюють підтримання рівноваги, підвищуючи відхилення центру маси тіла на 20-25%. Ці дані підтверджують, що стабільність є критичним обмеженням, яке може призводити до падінь і затримок під час евакуації.

Використання двобічних протезів нижніх кінцівок суттєво ускладнює координацію руху. Швидкість зміни напрямку руху знижується на 40%, а спуск сходами займає на 60-80% більше часу через необхідність точного розміщення протеза. Середня швидкість спуску становить 0,3-0,5 м/с порівняно з 1-1,6 м/с у осіб без ампутацій [5]. Це свідчить про те, що протези знижують ефективність маневрування в динамічному евакуаційному середовищі. Що важливо, таку поведінку дуже важко відтворювати за допомогою комп'ютерних симуляторів.

Ще одним визначальним фактором евакуації осіб з протезами є енерговитрати. Ампутація передбачає втрату деяких м'язів, внаслідок чого навантаження перерозподіляється на інші групи. Також встановлено, що маса протеза (1,5-3 кг на кінцівку) додатково збільшує енерговитрати на 5-10% на кожен кілограм, що особливо відчутно при тривалому русі [4]. Пересування з двосторонніми транстібіальними протезами потребує на 40-60% більше енергії, а для трансфеморальних ампутацій цей показник сягає 100-120% (рисунок 1).

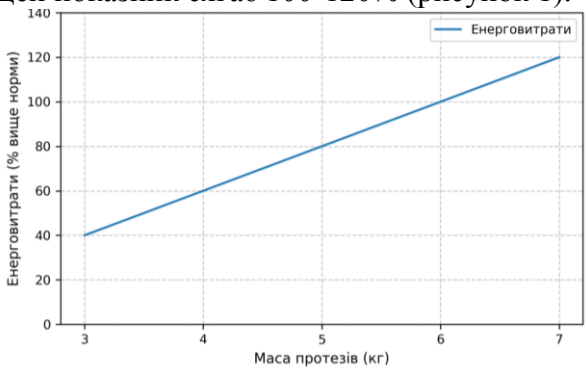


Рисунок 1 – Приблизне зростання енерговитрат залежно від маси протезів (узагальнено авторами)

При швидкості пересування, типовій для евакуації, критична втома (потреба в зупинці для відпочинку або суттєве зниження швидкості) в осіб з двома протезами може наставати за 2-3 хвилини, тоді як час руху в безпечну зону може потребувати значно більше часу. Якщо врахувати ймовірну наявність на окремих ділянках евакуаційних шляхів підвищених температур (понад 30°C), збільшення енерговитрат може додатково зростати на 10-15% через порушення терморегуляції. Ці дані підкреслюють, що фізична витривалість осіб із двосторонніми протезами обмежує їхню здатність долати тривалі евакуаційні маршрути.

Важливу роль у формуванні біомеханічних характеристик відіграє тип протезів та рівень ампутації. У порівнянні зі швидкістю евакуації осіб без ампутацій (100 м/хв, або 1,67 м/с на горизонтальних ділянках, і 80-100 м/хв, або 1,33-1,67 м/с на сходах), подвійні модульні протези забезпечують значно нижчі показники. Для осіб, що користуються двобічними транстібіальними протезами швидкість на горизонтальних ділянках може становити 35-50% від доампутаційної (0,6-0,8 м/с, або 35-50 м/хв), що зумовлено збереженням колінного суглоба, але обмежено вагою протезів (3-5 кг) і енерговитратами (+40-60%). На сходах швидкість зменшується до 20-30% (0,25-0,4 м/с, або 15-25 м/хв) через ускладнену координацію.

Особи, що користуються двобічними трансфеморальними протезами можуть досягати лише 25-40% на горизонтальних евакуаційних шляхах (0,4-0,7 м/с, або 25-40 м/хв) і 10-20% на сходах (0,15-0,3 м/с, або 10-15 м/хв), що пов'язано з втратою колінних суглобів, більшою вагою протезів (5-7 кг) і високими енерговитратами (+100-120%).

Біонічні протези, завдяки активним компонентам і адаптивним механізмам, дають змогу досягнути дещо кращих показників швидкості евакуації. Для транстібіальних протезів швидкість на горизонтальних ділянках становить 50-70% від швидкості до ампутації (0,8-1,2 м/с, або 50-70 м/хв), а на сходах — 30-45% (0,4-0,6 м/с, або 25-35 м/хв), що зумовлено зниженням енерговитрат до 20-40% вище норми та покращеною стабільністю. Трансфеморальні біонічні протези дають змогу досягнути 40-60% на горизонтальних ділянках (0,7-1,0 м/с, або 40-60 м/хв) і 20-35% на сходах (0,25-0,5 м/с, або 15-30 м/хв), оскільки мікропроцесорні коліна частково компенсують втрату суглоба, але енерговитрати залишаються високими (+70-90%) (рисунок 2).

Доцільно проаналізувати деякі додаткові умови, які за певних умов можуть виникати в процесі евакуації.

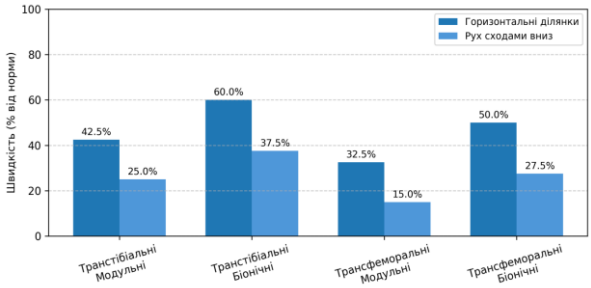


Рисунок 2 – Порівняння швидкості руху учасників евакуації з двосторонніми протезами

Це, зокрема, задимлення евакуаційних шляхів, розлита на підлогах вода, підвищена температура повітря. На вологих покриттях знижується зчеплення протезів із поверхнею, що зменшує швидкість і підвищує ризик падіння. У задимленому середовищі з видимістю менше 2 м погіршується точність розміщення протеза (особливо це стосується сходів), що сповільнює швидкість руху. В рідкісних випадках високі температури (понад 40°C) можуть викликати нагрів матеріалів протезів, знижуючи їхню ефективність через деформацію чи втрату амортизаційних властивостей.

Загалом причинно-наслідкові зв'язки між біомеханічними особливостями руху осіб із двосторонніми протезами нижніх кінцівок під час евакуації та можливими проблемами наведені на рисунку 4.

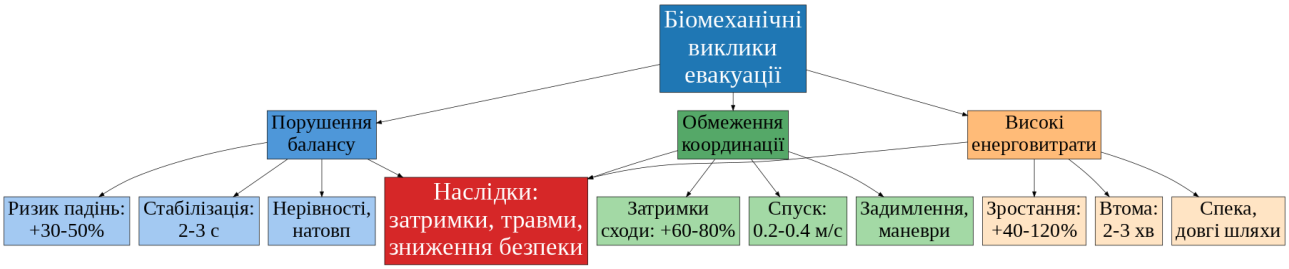


Рисунок 3 – Біомеханічні виклики та їх вплив на евакуацію осіб із двосторонніми протезами нижніх кінцівок

(розроблено авторами)

Аналіз літератури виявив значні прогалини в розумінні евакуаційної поведінки осіб із двосторонніми протезами. Сучасні стандарти протипожежної безпеки не враховують їхніх специфічних потреб, обмежуючись загальними рекомендаціями для осіб з інвалідністю. Наприклад, відповідно до [10] учасники евакуації з протезами віднесені до групи мобільності М2 з початковою швидкістю руху 30 м/хв. При цьому затверджена у цьому стандарті методика не дозволяє враховувати вид

протезу та рівень ампутації, що не відображає реального стану.

Моделювання евакуаційної поведінки людей з подвійними протезами нижніх кінцівок у програмному середовищі Pathfinder супроводжується низкою складностей, пов'язаних із відсутністю стандартних профілів таких осіб та необхідністю точного врахування їхніх фізіологічних і поведінкових особливостей. Зокрема, труднощі виникають при встановленні реалістичних параметрів швидкості пересування, реакції на тривогу, здатності пересуватися сходами чи пандусами, а також взаємодії з іншими учасниками евакуації. Існуючі моделі не враховують можливі зміни темпу руху в умовах стресу або обмеженої видимості, що може призвести до заниження ризиків у симуляціях. Тому виникає нагальна потреба в отриманні емпіричних (експериментальних) даних – зокрема шляхом спостереження або відеоаналізу тренувальних евакуацій, – для точного налаштування агентів, які репрезентують людей з протезами, що підвищить валідність результатів моделювання та ефективність планування евакуаційних заходів.

Отримані результати є обґрунтованими завдяки комплексному підходу до аналізу. Екстраполяція даних про біомеханіку протезування на умови евакуації базується на логічному врахуванні факторів середовища (температура, задимлення, поверхні), що підтверджується технічними характеристиками протезів і дослідженнями евакуаційної поведінки. По-третє, синтез якісного та кількісного аналізу дозволив не лише узагальнити наявні показники, а стати підґрунтям для розробки спеціальних практичних рекомендацій. Наприклад, зниження швидкості руху до 0,5-0,7 м/с на задимлених ділянках чи втома за 2-3 хвилини вказують на необхідність скорочення евакуаційних маршрутів впровадженням допоміжних засобів, зокрема, протипожежних ліфтів.

Таким чином, дослідження встановило, що біомеханічні особливості осіб із двосторонніми протезами (знижена стабільність, обмежена координація, високі енерговитрати та чутливість до умов середовища) суттєво ускладнюють їхню евакуацію при пожежі. Ці обмеження необхідно враховувати при розробці будівельних норм, правил та тренувальних програм, щоб забезпечити безпеку та інклюзивність.

Висновки та напрями подальших досліджень. У роботі досліджено біомеханічні особливості евакуації при пожежі осіб із двосторонніми протезами нижніх кінцівок Виконаний теоретичний аналіз ґрунтується на синтезі сучасних наукових даних із біомеханіки протезування, фізіології та моделювання евакуаційних процесів, що забезпечує обґрунтованість отриманих результатів.

Проведене дослідження дозволило систематизувати ключові обмеження, що впливають на їхню безпеку та ефективність руху. Аналіз показав, що порушення балансу (ризик падінь +30-50%, час стабілізації 2-3 с), обмеження координації (затримки на сходах +60-80%, швидкість спуску 0,2-0,4 м/с) та високі енерговитрати (+40-120% порівняно з нормою, настання втоми за 2-3 хв) суттєво ускладнюють евакуацію. Екстремальні умови середовища, такі як задимлення (зменшення швидкості орієнтовно на 25%), вологість (підвищення ризику посковзнутися на 20-30%) і температура додатково погіршують ситуацію. Порівняння типів протезів виявило переваги біонічних моделей на горизонтальних ділянках (швидкість до 1,5 м/с, енерговитрати +55%), однак на сходах їхня ефективність наближається до механічних (0,3-0,4 м/с).

Виявлено відсутність в сучасних нормативних підходах до евакуації осіб із двосторонніми протезами, зокрема відсутність адаптованих рекомендацій у ДСТУ. Результати підкреслюють необхідність проведення експериментальних досліджень (зокрема,

із застосування засобів штучного інтелекту і машинного навчання [14]) з метою встановлення регресійних залежностей швидкості руху учасників евакуації з двосторонніми протезами від типів протезів і щільності евакуаційних потоків, а також інших факторів. Подальші дослідження будуть зосереджені на моделюванні евакуаційної поведінки в реальних умовах і розробці інклюзивних нормативно-технічних рекомендацій для підвищення безпеки осіб із протезами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Черг для військових на протезування сьогодні немає. Як працює система допомоги тим, хто втратив кінцівки. Glavcom. URL: https://glavcom.ua/interviews/cherhi-dlja-vijskovikh-na-protezuvannja-sohodni-nemaje-jak-pratsjuje-sistema-dopomohi-tim-khto-vtrativ-kintsivki-1010816.html (дата звернення: 15.03.2025).
2. Цема Є., Хоменко І., Беспаленко А., Бур'янов А., Мішалов В., Кіх А. Клініко-статистичне дослідження рівня ампутації кінцівки у поранених // Клінічна хірургія. 2017. № 10. С. 51. DOI: 10.26779/2522-1396.2017.10.51.
3. Суполова К., Баркасі Д. Значення реабілітації у пацієнтів з двосторонньою трансфеморальною ампутацією // Україна. Здоров'я нації. 2022. № 3. С. 93–96. DOI: https://doi.org/10.24144/2077-6594.3.1.2022.266038
4. Waters R. L, Mulroy S. The energy expenditure of normal and pathologic gait. Gait Posture. 1999 Jul;9(3): 207-31. doi: 10.1016/s0966-6362(99)00009-0. PMID: 10575082.
5. Rigney S, Simmons A, Kark L. Energy Storage and Return Prostheses: A Review of Mechanical Models. Crit Rev Biomed Eng. 2016;44(4):269-292. doi: 10.1615/CritRevBiomedEng.2017020031. PMID: 29199578.
6. Bateni H. Postural Sway in Lower Extremity Amputees and Older Adults May Suggest Increased Fall Risk in Amputees. Can Prosthet Orthot J. 2020 Sep 20;3(2):33804. doi: 10.33137/cpoj.v3i2.33804.
7. Chen, L., Feng, Y., Chen, B. *et al.* Improving postural stability among people with lower-limb amputations by tactile sensory substitution. *J NeuroEngineering Rehabil* **18**, 159 (2021). https://doi.org/10.1186/s12984-021-00952-x
8. Hofstad C, Linde H, Limbeek J, Postema K. Prescription of prosthetic ankle-foot mechanisms after lower limb amputation. Cochrane Database Syst Rev. 2004;2004(1):CD003978. doi: 10.1002/14651858.CD003978.pub2.
9. ДСТУ 8828:2019. Пожежна безпека. Загальні положення. [Чинний від 2020-01-01]. Вид. офіц. Київ, 2018. 163 с.
10. ДБН В.2.2-40:2018. Інклюзивність будівель і споруд. [Чинний від 2019-04-01]. Вид. офіц. Київ, 2017. 70 с.
11. Kuligowski, Erica. (2020). Evacuation decision-making and behavior in wildfires: Past research, current challenges and a future research agenda. Fire Safety Journal. 120. 103129. 10.1016/j.firesaf.2020.103129.
12. Хлевной О. В., Харишин Д. В., Назаровець О. Б. Проблемні питання розрахунку часу евакуації при пожежах у закладах дошкільної та середньої освіти з інклюзивними групами // Пожежна безпека. 2020. № 29. С. 72–76. DOI: 10.32447/20784643.26.2022.05.
13. Fiedler, Goeran & Akins, Jonathan & Cooper, Rosemarie & Munoz, Santiago & Cooper, Rory. (2014). Rehabilitation of People with Lower-Limb Amputations. Current Physical Medicine and Rehabilitation Reports. In Press. 10.1007/s40141-014-0068-8.
14. Khlevnoi, O., Burak, N., Borzov, Y., Raita, D. Neural Network Analysis of Evacuation Flows According to Video Surveillance Cameras. In: Babichev, S., Lytvynenko, V. (eds) Lecture Notes in Data Engineering, Computational Intelligence, and Decision Making. ISDMCI 2022, vol 149. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16203-9_35.
15. Hanna E. What Do You Want to Do With the Leg? A Critical Narrative Review of theUnderstandings and Implications of Disposal in the Context of Limb Amputations. SAGEOpen. 2019; 9 (2) doi:10.1177/215824401985995
16. Abouammoh N, Aldebeyan W, Abuzaid R. Experiences and needs of patients with lower limbamputation in Saudi Arabia: a qualitative study. East Mediterr Health J. 2020.doi:10.26719/emhj.20.124.

0

REFERENCES

1. There are no queues for military prosthetics. How the state is helping those who have lost limbs. URL: https://glavcom.ua/interviews/cherhi-dlja-vijskovikh-na-protezuvannja-sohodni-nemaje-jak-pratsjuje-sistema-dopomohi-tim-khto-vtrativ-kintsivki-1010816.html#google_vignette (date of access: March 15, 2025).
2. Tsema, Ye., Khomenko, I., Bespalenko, A., Bur'ianov, A., Mishalov, V., & Kikh, A. (2017). Clinical and statistical study of the level of limb amputation in the wounded. *Klinichna khirurhiia*, (10), 51. https://doi.org/10.26779/2522-1396.2017.10.51
3. Supolova, K., & Barkasi, D. (2022). The importance of rehabilitation in patients with bilateral transfemoral amputation. *Ukraina. Zdorovia natsii*, (3), 93–96. https://doi.org/10.24144/2077-6594.3.1.2022.266038
4. Waters R. L, Mulroy S. The energy expenditure of normal and pathologic gait. Gait Posture. 1999 Jul;9(3): 207-31. doi: 10.1016/s0966-6362(99)00009-0. PMID: 10575082.
5. Rigney S, Simmons A, Kark L. Energy Storage and Return Prostheses: A Review of Mechanical Models. Crit Rev Biomed Eng. 2016;44(4):269-292. doi: 10.1615/CritRevBiomedEng.2017020031. PMID: 29199578.
6. Bateni H. Postural Sway in Lower Extremity Amputees and Older Adults May Suggest Increased Fall Risk in Amputees. Can Prosthet Orthot J. 2020 Sep 20;3(2):33804. doi: 10.33137/cpoj.v3i2.33804.
7. Chen, L., Feng, Y., Chen, B. *et al.* Improving postural stability among people with lower-limb amputations by tactile sensory substitution. *J NeuroEngineering Rehabil* **18**, 159 (2021). https://doi.org/10.1186/s12984-021-00952-x
8. Hofstad C, Linde H, Limbeek J, Postema K. Prescription of prosthetic ankle-foot mechanisms after lower limb amputation. Cochrane Database Syst Rev. 2004;2004(1):CD003978. doi: 10.1002/14651858.CD003978.pub2.
9. DSTU 8828:2019. Fire Security. Terms. [Valid from 2020-01-01]. Vyd. offic. Kyiv, 2018. 163 p.
10. DBN V.2.2-40:2018. Inclusiveness of buildings and structures. [Valid from 2019-04-01]. Kyiv, 2017. 70 p.
11. Kuligowski, Erica. (2020). Evacuation decision-making and behavior in wildfires: Past research, current challenges and a future research agenda. Fire Safety Journal. 120. 103129. 10.1016/j.firesaf.2020.103129.

12. Khlevnoi O.V., Kharyshyn D.V., Nazarovets O.B. Problems of calculating the time of evacuation in case of fires in preschool and secondary education institutions with inclusive groups. Fire safety. Lviv, 2020. Vol. 29. pp. 136–141. DOI: 10.32447/20786662.37.2020.11.
13. Fiedler, Goeran & Akins, Jonathan & Cooper, Rosemarie & Munoz, Santiago & Cooper, Rory. (2014). Rehabilitation of People with Lower-Limb Amputations. Current Physical Medicine and Rehabilitation Reports. In Press. 10.1007/s40141-014-0068-8.
14. Khlevnoi, O., Burak, N., Borzov, Y., Raita, D. Neural Network Analysis of Evacuation Flows According to Video Surveillance Cameras. In: Babichev, S., Lytvynenko, V. (eds) Lecture Notes in Data Engineering, Computational Intelligence, and Decision Making. ISDMCI 2022, vol 149. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-16203-9_35.
15. Hanna E. What Do You Want to Do With the Leg? A Critical Narrative Review of theUnderstandings and Implications of Disposal in the Context of Limb Amputations. SAGEOpen. 2019; 9 (2) doi:10.1177/215824401985995.
16. Abouammoh N, Aldebeyan W, Abuzaid R. Experiences and needs of patients with lower limbamputation in Saudi Arabia: a qualitative study. East Mediterr Health J. 2020.doi:10.26719/emhj.20.124.

BIOMECHANICAL CHARACTERISTICS OF MOVEMENT OF PERSONS WITH BILATERAL LOWER LIMB PROSTHESES DURING EVACUATION IN FIRE CONDITIONS

O. Khlevnoi[1], N. Zhezlo-Khlevna[1], O. Dotsenko[2], A. Borysova[2], A. Kalynovskyi[3]

[1]Lviv State University of Life Safety, Ukraine
[2]Institute of Scientific Research on Civil Protection of the National University of Civil Protection of Ukraine, Ukraine
[3]Національний університет цивільного захисту України, Україна

KEYWORDS:
bilateral amputations, modular prostheses, bionic prostheses, energy expenditure, evacuation speed, transtibial amputations, transfemoral amputations, fire safety

ABSTRACT

The article examines the biomechanical constraints of individuals with bilateral lower limb amputations during fire evacuation, driven by the full-scale war in Ukraine, which has increased the number of such individuals (over 50,000 as of 2023). The research focuses on the functional characteristics of modular and bionic prostheses (weight 3-7 kg) for transtibial and transfemoral amputations, particularly their impact on energy expenditure and movement speed. The study aims to assess energy costs and evacuation speed to inform the standardization of fire safety regulations for evacuation routes and exits. The analysis reveals that modular prostheses enable speeds of 25-50% of pre-amputation levels on horizontal surfaces (0.4-0.8 m/s) and 10-30% on stairs (0.15-0.4 m/s), while bionic prostheses achieve higher rates of 40-70% (0.7-1.2 m/s) and 20-45% (0.25-0.6 m/s), respectively. Energy expenditure increases by 5-10% per kilogram of prosthesis weight, reaching +40-60% for transtibial and +100-120% for transfemoral amputations. Graphical dependencies of energy costs on prosthesis weight and comparisons of evacuation speeds were developed, confirming the significant influence of prosthesis type and amputation level. The findings highlight the need to adapt existing evacuation time calculation methods to account for reduced speed and high fatigue (effective distance 50-100 m) in individuals with bilateral lower limb prostheses. The scientific novelty lies in the comprehensive analysis of biomechanical characteristics of bilateral prostheses in the context of evacuation, conducted for the first time in Ukraine with consideration of the war context. Quantitative indicators of speed and energy expenditure provide a basis for updating regulatory standards. The practical value of the study is in supplying data for developing inclusive evacuation strategies that address the needs of individuals with limited mobility, particularly in emergency situations.