

УДК 617.3

АНАЛІЗ ВПЛИВУ РІЗНИЦІ ДОВЖИНИ НИЖНІХ КІНЦІВОК НА
БІОМЕХАНІЧНІ ПАРАМЕТРИ ХОДИ

Цапенко В. В., Терещенко М. Ф.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

E-mail: capenko.valik@ukr.net, agfarkpi@i.ua

У статті приведено результати аналізу впливу різниці в довжині нижніх кінцівок на біомеханічні параметри ходи. Діагностика постави людини не була повною без вимірювання і оцінки стану опорно-ресорних властивостей стопи. Сучасний етап розвитку приладобудування актуалізує прикладний аспект аналізу локомоцій людини. Метою даної статті є розробка методу аналізу впливу різної довжини нижніх кінцівок на біомеханічні параметри ходи, підвищення точності дослідження деформацій стоп та їх кількісної оцінки. Розглянуті шляхи вирішення цієї задачі, а саме застосовано комплексний підхід з використанням аналізу та узагальнення даних спеціалізованої науково-методичної літератури; візуальний скринінг; бароподометрія; плантографія та методи математичної статистики. В якості об'єкта дослідження обрано дві групи людей: контрольна (умовно здорова) та експериментальна (з вкороченням однієї з нижніх кінцівок). В ході дослідження, було проаналізовано вплив різновисокості нижніх кінцівок на біомеханічні параметри руху для контрольної та експериментальної груп досліджуваних. Встановлено, що у обстежуваних з вкороченням довжини однієї з нижніх кінцівок, при динамічному обстеженні, з збільшенням різниці в довжині підвищується сумарне навантаження на стопу вкороченої кінцівки, сила переднього поштовху та навантаження на передній відділ стопи. Збільшення тривалості опори на інтактну кінцівку створювало картину асиметрії або кульгавості, відносна слабкість м'язів гомілки ураженої кінцівки змушувала обстежуваних з обережністю здійснювати передній і задній поштовхи, які знижені в порівнянні з нормою. Результати даного дослідження можуть успішно використовуватись для подальших досліджень в області клінічного аналізу рухової діяльності, моніторингу стану стопи та стати інструментом для оцінки ефективності різноманітних методів лікування опорно-рухового апарату. Також результати можуть бути використані в науково-дослідній діяльності та слугувати експертною оцінкою функціональних порушень у пацієнтів з ураженням опорно-рухової і нервової систем, вестибулярними порушеннями.

Ключові слова: біомеханіка; стопа; вкорочення; сумарне навантаження; хода; статична складова; динамічна складова.

Вступ

Провідне місце серед захворювань опорно-рухового апарату займають різні деформації стоп. Вивчення біомеханіки нижніх кінцівок у нормі та при різноманітних деформаціях є вкрай необхідним і дуже перспективним [1].

У сучасній біомедичній інженерії досить молодим та перспективним напрямком є клінічний аналіз рухової діяльності [2], дослідження різноманітних патологій ходи та основної стійки, з використанням методів біомеханіки. Не викликає сумнівів значимість оцінки функціонального стану опорно-рухової системи у пацієнтів травматолого-ортопедичного та неврологічного профілю, але між тим, в даний час, методи інструментального аналізу ходи ще не отримали широкого розповсюдження та впровадження в широку клінічну практику вітчизняних лікувальних установ та реабілітаційних центрів. Найчастіше оцінка біомеханічних функцій проводиться візуально і має велику частку суб'єктивізму [3-4]. Інформація, отримана за допомогою спеціалізованої апаратури, може бути використана на всіх етапах лікувального процесу – від діагностики захворювання з виявленням

провідної патологічної ланки до оцінки правильності проведеного лікування, дослідження очікуваних та віддалених результатів реабілітації, виконання експертної оцінки, тощо [5-9].

Таким чином, прикладний аспект аналізу локомоцій людини, в сучасній біомедичній інженерії, є дуже актуальним та перспективним.

Постановка задачі

При оцінці локомоцій у хворих з вродженим або набутих вкороченням довжини однієї з нижніх кінцівок виявляється ряд особливостей пов'язаних зі зниженням скорочувальної здатності м'язів, компенсацією різновисокості нижніх кінцівок за рахунок перекоосу таза, тенденції до еквінусної установки стопи і тд. З віком і збільшенням маси тіла обстежуваних, підтримка таких параметрів ходи як: мінімального відхилення руху центру мас від рівномірного і прямолінійного, зведення до мінімуму енерговитрат за рахунок параметричної оптимізації конфігурації ходьби [3], продовжує залишатися особливо складною задачею. Для аналізу таких параметрів потрібне застосування додаткового інструментального дослідження [10]. Поява, в останні

роки, комп'ютеризованих діагностичних комплексів дозволила не тільки виявляти патологічні відхилення в рухових актах, а й оцінювати якість і структуру рухів. До таких діагностичних комплексів відноситься, зокрема, система «Diasu Biometric System» (DBS), розроблена в Італії [1].

Стопа є першою, найбільш навантаженою ланкою опорно-рухового апарату. Вона здійснює контакт з опорою, перерозподіляє силу реакції опори на розташовані вище сегменти опорно-рухового апарату (ОРА) та виконує важливу ресурсну функцію, забезпечує стійкість нижньої кінцівки та зчеплення з опорною поверхнею [1]. Для об'єктивної оцінки впливу деформації стоп на стояння та ходу необхідні клінічний аналіз руху та постурологічне обстеження. На сьогодні, найбільш інформативними методами аналізу рухів є подоконтурометрія (аналіз морфологічної структури стопи), стабілометрія (кількісна оцінка рухових можливостей) та бароподометрія (оцінка функцій стопи в динамічному та статичному положеннях). Таким чином, вивчення біомеханіки нижніх кінцівок є вкрай необхідним і дуже перспективним у плані оцінки стану ОРА людини та прогнозу його динаміки.

Дослідження проводилося з метою аналізу впливу різної довжини нижніх кінцівок на біомеханічні параметри ходи.

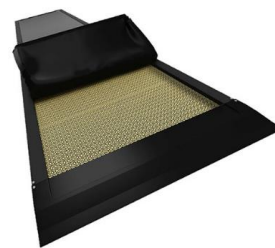
Методика дослідження

Поставлена задача дослідження шляхом застосування комплексного підходу з використанням аналізу та узагальнення даних спеціалізованої науково-методичної літератури; візуального скринінгу; бароподометрії; плантографії та методів математичної статистики.

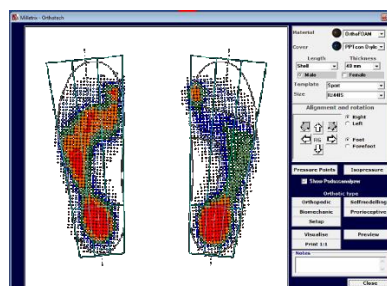
В якості високоінформативного параметра для оцінки функціонального стану нижніх кінцівок пропонується розглядати такий показник, як варіабельність сумарного навантаження (інтеграл вертикальної складової реакції опори). Даний показник дозволяє виявляти патологію на ранніх стадіях, ознаки нестабільності в суглобах нижніх кінцівок, можливість компенсаторних реакцій тощо [3].

Об'єктом для даного дослідження стали декілька груп людей: в першу групу (контрольну) увійшли 15 умовно здорових людей віком 18-35 років з середньою масою тіла 65 кг, другу групу (експериментальну) склали 15 людей того ж віку та маси з вкороченням нижньої кінцівки 5-30 мм. Інструментальною базою дослідження стала цифрова біометрична система аналізу руху «DBS», яка включала в себе 2-х секційну бароподометричну платформу, розмірами 0,4·1,8·0,02 м, з відповідним програмним забезпеченням (рис. 1) [1].

Основні технічні характеристики системи наведено в таблиці 1 [1].



а)



б)

Рис. 1. Цифрова біометрична система аналізу руху «DBS»: а) зовнішній вигляд бароподометричної платформи б) вікно аналізу програми

В дослідженні використовувався метод бароподометрії, який дозволяє об'єктивізувати дослідження з врахуванням статичної, динамічної та стабілометричної складових. Бароподометр складається з 4 активних модулів, розмірами 0,4·0,4 м та 4 пасивних. В кожному активному модулі вмонтовано 6400 сенсорів (загальна кількість сенсорів на платформі становить 25600). Платформа працює у двох режимах: статичному (дозволяє проводити тести на статичне та стабілометричне дослідження) та динамічному. Бароподометрія статичного положення визначає розподіл зон навантаження, окреслює периметр опорного полігону, фіксує центри положення стопи та проекцію центру тяжіння тіла та його зміщення, розраховує відсоткові співвідношення опорної поверхні та сили тиску, зокрема й перенавантаження кінцівки чи ротацію тазу.

Бароподометрія в динаміці показує, як розподіляється тиск під час перекауту кожної стопи. Точка приземлення, контакту та поштовху в нормі мають чітку послідовність, швидкість та силу. За графічним відображенням руху можна чітко відслідкувати стабільність суглобів, латеральні чи медіальні порушення руху. Різниця руху, наприклад, колінного суглобу й напрям руху стопи може спричинити розбалансованість або травму суглобів. Фіксуються цикли руху з часовими характеристиками моноопори та подвійної опори [1].

В ході клінічного обстеження пацієнтів фіксували скарги, відомості про попереднє лікування, оцінювали загальний вигляд стопи, стан поздовжнього та поперечного склепінь, мобільність деформації. Обстежуваний знаходився в фізіологічній

позі стоячи, опираючись обома стопами на опорну поверхню бароподометру – проводиться статичне та стабілометричне дослідження. Потім процедура повторюється при ходьбі – динамічне дослідження (5-10 проходів в звичайному, спокійному темпі),

оцінюється структура графіків динамічних кривих, траєкторія переміщення загального центру мас, розподіл навантаження по підошовній поверхні тощо.

Таблиця 1. Технічні параметри біометричної системи аналізу руху

Параметри	Значення
Енергоживлення	AC input: 100-240V - 1.0A, 50-60Hz DC output: 12V - 2.5A
Сумісність з операційними системами	Windows 10*64 bit
Інтерфейс	USB 3.0
Роздільна здатність, dpi	x,y=9,6, z=16
Точність	± 5%
Тип сканування	Матричний
Тиск на точку, Па/см ²	max 150
Частота вимірювання, кадрів/с	min 30 max 100
Тип сенсору	високорезистивний датчик з активною матрицею
Кількість сенсорів на 1 см ²	4
Розмір сенсору, мм	25
Режими сканування	-
Максимально допустима площа сканування, см ²	-

Всі отримані дані проходили статистичну обробку, за допомогою пакету програми Statistica 8.0 методами варіаційної статистики. Тип розподілу описуваних вище параметрів нормальний, визначався за методом Шапико-Уїлса. Ступінь точності дослідження визначається ймовірністю безпомилкового прогнозу меншим або рівним 0,98 %, рівнем статистичної значимості $p \leq 0,02$. Також використовувався критерій Стюдента $t=2$.

Результати дослідження та обговорення

Встановлено, що в ряді випадків при традиційному лікуванні підбір ортопедичного взуття і виконання корекції укорочення кінцівки, проведені без аналізу об'єктивних даних про характер постурологічних порушень, виявляються неефективними, а в ряді випадків негативно впливають на процес реабілітації. Підбір спеціальних ортопедичних компенсаторів проводиться строго індивідуально в процесі етапних статичних та стабілометричних обстежень [3] (рис. 2).

Критерієм правильного підбору компенсаторів є нормалізація значень біомеханічних параметрів, наприклад, наближення положення загального центру мас пацієнта в сагітальній і фронтальній площині до розрахункової фізіологічної норми, зменшення площі статокінезіограми, що свідчить про більшу постуральну стійкість, зменшення енерговитрат на підтримку пози, тощо (рис. 3).

За допомогою програмно-апаратного комплексу (рис. 1) було визначено основні просторово-часові параметри циклу кроку (див. Табл. 2).

Наведено співставлення основних параметрів між першою умовно здоровою та групою з плоско-

вальгусною деформацією стоп.

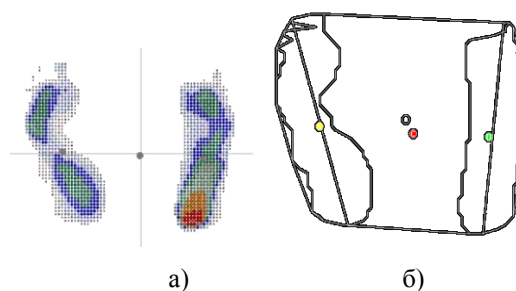


Рис. 2. Статичний аналіз обстежуваного з вкороченням 15 мм правої нижньої кінцівки: а) аналіз розподілу навантаження по опорній поверхні стопи б) статичний опорний полігон

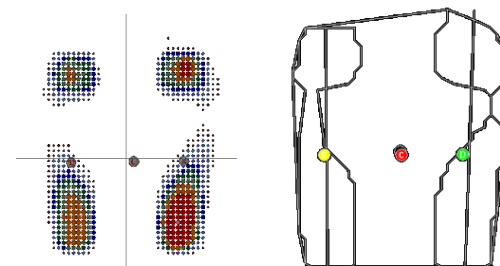


Рис. 3. Статичний аналіз обстежуваного з компенсацією вкорочення нижньої кінцівки

При оцінці статичної та динамічної складових варіабельності сумарного навантаження – виявлено, що з збільшенням різниці довжини нижніх кінцівок пікові значення сумарного навантаження

динамічної складової плавно знижуються, в той час коли середні значення динамічної та статичної складових розподілені за законом відмінним від

нормального, що свідчить про наявність компенсаторних реакцій та нестабільність в суглобах нижніх кінцівок (рис. 4).

Таблиця 2. Біомеханічні параметри циклу кроку дітей

Параметр	1 група	2 група	
		Інтактна кінцівка	Вкорочена кінцівка
Каденція (темп), кроків/хв	72,5 ± 3,9	52,1 ± 4,1	
Період подвійної підтримки, с	0,23 ± 0,2	0,25 ± 0,04	0,242 ± 0,02
Період одиночної підтримки, с	0,34 ± 0,1	0,42 ± 0,03	0,39 ± 0,06
Довжина напівкроку, м	0,55 ± 0,1	0,57 ± 0,1	
Час напівкроку, с	0,48 ± 0,1	0,59 ± 0,1	
Час перекачу, с	0,36 ± 0,009	0,48 ± 0,06	0,45 ± 0,06
Довжина кроку, м	1,03 ± 0,1	1,07 ± 0,12	
Час циклу кроку, с	0,98 ± 0,1	1,1 ± 0,12	
Швидкість кроку, м/с	1,07 ± 0,2	0,92 ± 0,12	
Передній поштовх (% від маси тіла)	45 ± 3,1	59 ± 9,0	50 ± 10,1
Задній поштовх (% від маси тіла)	81 ± 4,7	59 ± 9,5	54* ± 10,8

* - Різниця з показниками групи здорових достовірність, $p \leq 0,05$.

Встановлено, що у здорових людей тривалість опори на кожен стопу дорівнює 32-38 % від тривалості кроку. При цьому період перенесення кінцівки над опорою становить 45-51 %, період перекачу через стопу – 31-41 % тривалості кроку. У хворих швидкість локомоції знижена, при ходьбі, в довільному темпі, тривалість періоду кроку виявилася більшою, ніж у здорових людей, в середньому на 10 %.

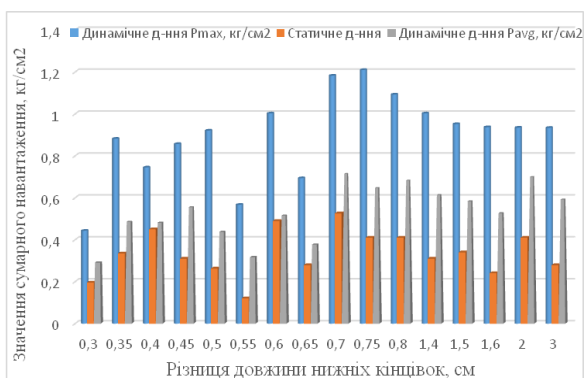


Рис. 4. Варіабельність статичної та динамічної складових сумарного навантаження на стопу вкороченої нижньої кінцівки

Співвідношення тривалості перенесення кінцівки над опорою і перекачу через стопу в нормі склало 65 %, у хворих на інтактній кінцівці – 52 %, на укороченій – 65 %. Збільшення тривалості опори на інтактну кінцівку на 7% створювало картину асиметрії або кульгавості [11-14]. Відносна слаб-

кість м'язів гомілки ураженої кінцівки у хворих змушувала їх з обережністю здійснювати передній і задній поштовхи, які знижені в порівнянні з нормою на 38 % і 29 %.

Середнє значення максимального навантаження на відділи стопи у хворих при стоянні знижено на 20 %, при ходьбі - на 33 %.

Таким чином, в обстежуваних з вкороченням однієї з нижніх кінцівок зафіксоване збільшення часових параметрів ходи, встановлено, що чим більша величина укорочення, тим менше навантаження приходить на укорочену кінцівку як при стоянні, так і при ходьбі, що в свою чергу викликає появу компенсаторних реакцій та нестабільність в суглобах нижніх кінцівок.

Висновки

Оцінка біомеханічних параметрів циклу кроку можуть успішно використовуватися для моніторингу стану стопи, встановлення діагнозу та ефективності різноманітних методів лікування.

В обстежуваних з вкороченням однієї з нижніх кінцівок зафіксовано зниження швидкості та темпу кроку, збільшення тривалості періоду кроку, істотне зниження сили заднього поштовху і навантаження на опорну поверхню стоп. Аналіз статичної та динамічної складових варіабельності сумарного навантаження показав прямо пропорційну залежність між величиною різниці в довжині нижніх кінцівок та появою компенсаторних реакцій, що призводить до нестабільності в суглобах нижніх кінцівок.

Результати даного дослідження можуть бути використані в науково-дослідній діяльності та слугувати експертною оцінкою функціональних порушень у пацієнтів з ураженням опорно-рухової і нервової систем, вестибулярними порушеннями; для визначення тактики лікування та контролю ефективності консервативних і оперативних лікувальних заходів, протезування кінцівок. Основною рушійною силою подальшого зростання біомеханічних методів діагностики ОРА є розширення їхніх функціональних можливостей. Практичне значення отриманих результатів полягає у вдосконаленні існуючих методів діагностування функціональних параметрів стопи та розробці, виготовленні та впровадженні в медичну практику вітчизняної діагностичної системи дослідження біомеханічних параметрів стопи.

Література

- [1] В. В. Цапенко, М. Ф. Терещенко, Г. С. Тимчик, “Моделі оцінювання біомеханічних параметрів нижніх кінцівок у дітей”, Наукові вісті НТУУ «КПІ», №2019/1, с. 67-75, 2019.
- [2] К. Вонсевич, М. Ф. Гетцель, Е. Мрозовски, Я. Аврейцевич, М. Безуглий, “Система управління движениями пальцев на основе модели искусственной нейронной сети”, *Известия ВУЗов. Радиоэлектроника*, Т.62, № 1, с. 23-33, 2019.
- [3] Н. Ромакина, А. Федонников, С. Киреев та ін., “Использование методов биомеханики в оценке состояния и коррекции патологии опорно-двигательной системы (обзор)”, *Саратовский научно-медицинский журнал*, №3, с. 310-316, 2015.
- [4] Негреева М.Б., Шендеров В.А., Комогорцев И.Е. и др. Биомеханические исследования в диагностике, лечении и реабилитации больных с патологией нижних конечностей, тазового пояса и позвоночника: итоги и перспективы. Бюллетень ВСНЦ СО РАМН 2006; 4 (5): 201– 206.)
- [5] В. В. Цапенко, М. Ф. Терещенко, “Метод дослідження біомеханічних параметрів стопи людини”, *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, Том 29 (68), № 5, ч.1, с. 51-59, 2018.
- [6] В. В. Цапенко, М. Ф. Терещенко, “Методика дослідження просторових параметрів стопи людини”, на *XI Міжнар. наук.-практ. конф. Інтегровані інтелектуальні роботи технічні комплекси (ІРТК)*, Київ, 2018, с. 157-159.
- [7] П. М. Гаже, Б. Вебер, *Постурология: Регуляция и нарушения равновесия тела человека*: пер. с франц. под ред. В.И. Усачева. СПб, Россия: Издат. дом СПбМАПО, 2008.
- [8] В. В. Цапенко, М. Ф. Терещенко, “Цифрова біометрична система дослідження патологічних станів стопи”, на *Міжнар. наук.-техн. конфер. Актуальні проблеми автоматизації та приладобудування*, 2017, с. 89-90.
- [9] Скворцов Д. В. Диагностика двигательной патологии инструментальными методами: анализ походки, стабилметрия. Москва, Россия:, 2007.
- [10] К. П. Вонсевич, М. О. Безуглий, А. О. Гапонюк, “Оцінювання часових характеристик електроміограми функціональних рухів кисті руки для інтуїтивного керування біонічним протезом”, *Наукові Вісті НТУУ КПІ*, № 1, с. 45-53, 2018.
- [11] В. Щуров, К. Новиков, С. Мурадисинов, “Влияние разницы высоты нижних конечностей на биомеханические параметры ходьбы”, *Российский журнал биомеханики*, №4, с. 102-107, 2011.
- [12] Д. В. Скворцов, “Биомеханические методы в реабилитации патологии походки и баланса тела”, автореф. дис. д-ра мед. наук, Москва, 2008.
- [13] А. А. Жиляев, “Биомеханические и электрофизиологические критерии оценки опорно-двигательного аппарата нижних конечностей”, автореф. дис. д-ра тех. наук., Москва, 2003.
- [14] Д. А. Киселев, С. С. Гроховский, О. В. Кубряк, Консервативное лечение нарушений опорной функции нижних конечностей в ортопедии и неврологии с использованием специализированного стабилметрического комплекса ST150. Москва, Россия: Маска, 2011.

УДК 617.3

В. В. Цапенко, Н. Ф. Терещенко

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, Украина

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РАЗНОВЫСОКОСТИ НИЖНИХ КОНЕЧНОСТЕЙ НА БИОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ПОХОДКИ

В статье приведены результаты анализа влияния разницы в длине нижних конечностей на биомеханические параметры ходьбы. Диагностика осанки человека не была бы полной без измерения и оценки состояния опорно-рессорных свойств стопы. Современный этап развития приборостроения актуализирует прикладной аспект анализа локомоций человека. Целью данной работы является разработка метода анализа влияния различной длины нижних конечностей на биомеханические параметры походки, повышение точности исследования деформаций стоп и их количественной оценки. Рассмотрены пути решения этой задачи, а именно применен комплексный подход с использованием анализа и обобщения данных специализированной научно-методической литературы; визуальный скрининг; бароподометрия; плантография и методы математической статистики. В качестве объек-

та дослідження вибрані дві групи людей: контрольна (умовно здорова) і експериментальна (з укороченням однієї з нижніх кінцівок). В ході дослідження було проаналізовано вплив різновисокості нижніх кінцівок на біомеханічні параметри руху для контрольної і експериментальної груп испытуємих. Установлено, що у обстежуваних з укороченням довжини однієї з нижніх кінцівок, при динамічному обстеженні, з збільшенням різниці в довжині підвищується сумарна навантаження на стопу укороченої кінцівки, сила переднього толчка і навантаження на передній відділ стопи. Збільшення тривалості опори на інтактну кінцівку створювало картину асиметрії або хромоти, відносна слабкість м'язів гомілки ураженої кінцівки змушувала обстежуваних з обережністю здійснювати передній і задній толчки, які знижені порівняно з нормою. Результати даного дослідження можуть успішно використовуватися для подальших досліджень в області клінічного аналізу рухової діяльності, моніторингу стану стопи і стати інструментом для оцінки ефективності різних методів лікування опорно-рухового апарату. Також результати можуть бути використані в науково-дослідницькій діяльності і служити в якості експертної оцінки функціональних порушень у пацієнтів з ураженням опорно-рухової і нервової систем, вестибулярними порушеннями.

Ключові слова: біомеханіка; стопа; укорочення; сумарна навантаження; походка; статична складова; динамічна складова.

V. V. Tsapenko, M. F. Tereshchenko

*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
Kyiv, Ukraine*

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF DIFFERENCE BETWEEN LOWER FINDINGS ON BIOMECHANICAL PARAMETERS OF WALKING

The article presents the results of the analysis of the effect of the difference in the length of the lower extremities on the biomechanical walking parameter. Diagnosis of posture of a person would not be complete without measuring and assessing the condition of the support-spring characteristics of the foot. The modern stage of the development of instrument making actualizes the applied aspect of the analysis of human locomotives. The purpose of this work is to develop a method for analyzing the effect of different lengths of the lower extremities on the biomechanical parameters of the gait, increasing the accuracy of the study of the deformations of the feet and their quantitative evaluation. The ways of solving this problem are considered, namely, the complex approach with the use of analysis and generalization of the data of the specialized scientific-methodical literature is applied; visual screening; baropodometry; planography and methods of mathematical statistics. As a research object, two groups of people were selected: control (healthy) and experimental (with a shortening of one of the lower extremities). In the course of the study, the effect of the multiplicity of the lower extremities on the biomechanical parameters of motion for the control and experimental groups of the subjects was analyzed. It was established that the subjects with a shortened length of one of the lower limbs, with a dynamic examination, with an increase in the difference in length, increases the total load on the foot of the shortened limb, the force of the forward push and the load on the front of the foot. An increase in the duration of support for the intact limb created a picture of asymmetry or lameness, the relative weakness of the leg muscles of the affected limb caused the subjects with caution to carry out the anterior and posterior shocks, which were lowered compared with the norm. The results of this study can be successfully used for further research in the field of clinical analysis of motor activity, foot stance monitoring and become a tool for assessing the effectiveness of various methods of treating the musculoskeletal system. In addition, the results can be used in research and serve as an expert assessment of functional disorders in patients with damage to the musculoskeletal and nervous systems, and vestibular disorders system.

Keywords: biomechanics; foot; shortening; total load; gait; static component; dynamic component.

*Надійшла до редакції
04 квітня 2019 року*

*Рецензовано
12 квітня 2019 року*