

# ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

УДК616.748.54–018.38–008.6:617.586–007.54:001.42

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ СТРУКТУР ЗАДНІХ ВІДДІЛІВ СТОПИ НА МОДЕЛЯХ СТОПИ ІЗ ЗАП'ЯТКОВИМ БУРСИТОМ ТА СИНДРОМОМ HAGLUND'А В РІЗНИХ БІОМЕХАНІЧНИХ УМОВАХ

*Б. С. Герасимюк, І. А. Лазарев, О. С. Мовчан,  
М. В. Скибан*

**Національна медична академія післядипломної освіти  
імені П. Л. Шупика, м. Київ**

**Резюме.** В ході даного експериментального дослідження за допомогою розроблених математичних моделей були отримані результати значень напружено-деформованого стану анатомічних структур заднього відділу стопи в різних біомеханічних умовах. Значення зростання напруження на ахілловому сухожиллі в процесі переходу з нейтрального положення у положення тильної флексії на 96,24 % більше у моделі с синдромом Haglund'a та на 68,0 % більше у моделі з зап'ятковим бурситом в порівнянні з інтактною моделлю. Це пояснює розвиток дегенеративно-дистрофічних процесів в ахілловому сухожиллі у хворих з зап'ятковим бурситом або синдромом Haglund'a.

**Ключові слова:** зап'ятковий бурсит, синдром Haglund'a, тендопатія.

**Вступ.** Зап'ятковий бурсит (ЗБ) — запальне захворювання, яке виникає внаслідок механічного імпінджменту зап'яткової (глибокої) синовіальної бурси, розташованої між ахілловим сухожиллям (АС) і задньо-верхніми відділами п'яткової кістки. Синдром Haglund'a був описаний шведським хірургом-ортопедом Patrik Haglund у 1928 році [1, с. 50] та включав в себе поняття зап'яткового бурситу, але спричиненого імпінджментом синовіальної сумки між АС та збільшеними задньо-верхніми відділами п'яткової кістки — т.н. “деформацією Haglund'a” [2, с. 433]. Karjalainen P. T., Soila K. та ін. в своєму дослідженні 118 АС методом магніто-резонансної томографії діагносту-

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

---

вали в 19% випадків збільшену зап'яткову бурсу. Також було встановлено, що у 15 з 18 випадків інерційної тендопатії був виявлений ЗБ [3, с. 254]. Todd A. Irwin в своєму дослідженні [4, с. 933] також вказує на зв'язок між запальними процесами в синовіальних бурсах та дегенеративними змінами самого сухожилля — між ЗБ та розвитком супутньої тендопатії. В ході ретроспективного дослідження [5, с. 7] 176 пацієнтів з інерційною ахілотендопатією Håkan Alfredson і Christoph Spang виявили, що у 74% пацієнтів було також діагностовано поверхневий і зап'ятковий бурсити, а також синдром Haglund'a. Тому, ґрунтуючись на попередніх дослідженнях, можна говорити про те, що зв'язок між ЗБ або синдромом Haglund'a і тендопатією, якщо не очевидний, що дуже ймовірний і вимагає подальшого вивчення.

Ми провели науковий пошук серед літературних джерел та не знайшли будь-яких досліджень напружено-деформованого стану (НДС) структур заднього відділу стопи (АС, глибока синовіальна bursa, п'яtkова кістка) при ЗБ. Ми вважаємо, що саме глибоке розуміння біомеханіки перерахованих вище структур дозволить краще зрозуміти проблему діагностики та лікування хворих з ЗБ або синдромом Haglund'a.

**Мета дослідження** — дослідити напружено-деформований стан структур задніх відділів стопи в різних біомеханічних умовах.

**Матеріали та методи.** На початковому етапі, для усіх подальших біомеханічних розрахунків, засобами програмного пакета «SolidWorks» було створено імітаційну 3-D модель стопи. Для визначення сили натягу ікроножного м'язу та ахіллового сухожилля при стоянні та в акті ходи була створена розрахункова схема та проведені математичні обчислення. В розрахунках було використано усереднені дані людського тіла: орієнтовна вага — 70 кг, зріст — 170 см.

В результаті обчислень ми отримали наступні значення навантажень на ахіллове сухожилля:

– для утримання тіла в положенні стоячи ахіллове сухожилля розвиває зусилля в 458 Н;

– для утримання стопи при наступанні на площу опори (передній поштовх) ахіллове сухожилля розвиває зусилля 277 Н (65% від сили стояння) і 182 Н (35%) розвиває передня група м'язів гомілки в якості стабілізаторів;

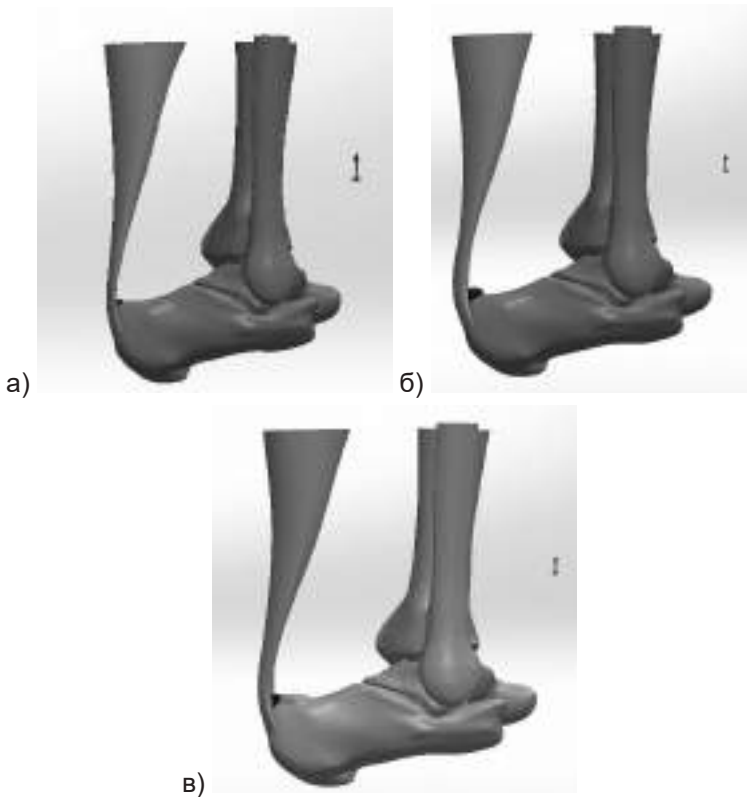
– для відриву стопи від площі опори (задній поштовх) і підйому її на кут  $10^\circ$  ахіллове сухожилля розвиває зусилля в 1028 Н.

Подальші розрахунки здійснювали методом СЕ, який дозволяє дослідити еволюцію процесу деформування елементів імітаційної моделі стопи, а саме — кісткової тканини, бурси та ахіллового сухожилля, з великими геометричними і фізично нелінійними властивос-

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

тями матеріалів і змінними в часі зовнішніми впливами. Для проведення розрахунків НДС методом СЕ імітаційні моделі було імпортовано у програму «ANSYS». У напівавтоматичному режимі згенеровано СЕ моделі, які налічували в середньому 332 906 вузлів та 191 538 елементів. Для збільшення точності розрахунків СЕ сітка ущільнена в ділянках контакту та для елементів бурси та сухожилля. СЕ сітка представлена переважно тетраедричними елементами, розмір яких на основній моделі не перевищує 1 мм, у місцях згущення 0,1–0,5 мм.

У подальшому розглянуто 3 моделі для кожного варіанту дослідження (Рис. 1) — інтактна модель, модель із ЗБ та модель із синдромом Haglund'a для трьох положень у гомілковостопному суглобі: нейтральне, передній поштовх (підшовна флексія  $-10^\circ$ ) і задній поштовх (тильна флексія  $+10^\circ$ ).



**Рис. 1. Імітаційні 3D моделі: інтактна модель (а), модель з бурситом (б) та модель із синдромом Haglund'a (в).**

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

У напівавтоматичному режимі згенеровано СЕ моделі, які налічували в середньому 332 906 вузлів та 191 538 елементів. Для збільшення точності розрахунків СЕ сітка ущільнена в ділянках контакту та для елементів бурси та сухожилля. СЕ сітка представлена переважно тетраедричними елементами, розмір яких на основній моделі не перевищує 1 мм, у місцях згущення 0,1–0,5 мм.

Ключовими показниками для порівняльного аналізу обрані дані, отримані шляхом розрахунків значення інтенсивності напружень та деформацій які визначали на усіх елементах моделі: АС, зап'яткової бурси, таранній кістки та п'ятковому горбі.

**Результати та їх обговорення.** На прикладі інтактно́ї моделі в експерименті визначено коливання значень НДС в процесі моделювання акту ходьби. Результати розрахунків НДС інтактно́ї моделі представлені у табл. 1.

Таблиця 1

### Зведена таблиця результатів розрахунків НДС для інтактно́ї моделі у різних положеннях гомілковоступневого суглоба.

	Підошовна флексія -10°	Нейтральне положення 0°	Тильна флексія +10°
Ахіллове сухожилля, Мра	4,25	7,05	15,82
Зап'яткова bursa, Мра	1,83	3,25	7,41
Таранна кістка, Мра	2,72	2,31	4,04
П'ятковий горб, Мра	2,72	2,04	4,04

У положенні підошовної флексії стопи напруженість найменша. Це пов'язано як з розслабленням самого сухожилля, так і зі збільшенням обсягу зап'яткового рецессуса, де розташована глибока синовіальна bursa. Ця структура сприяє рівномірному розподілу сил з передньої поверхні АС на задньо-верхні відділи п'яткової кістки. Також bursa амортизує «удари» сухожилля по нерівній задній поверхні п'яткової кістки при різкому тильному згинанні. Тому зап'яткова bursa відіграє важливу роль у функціюванні біомеханічної системи «АС-п'ятковий горб».

Результати розрахунків НДС моделі з зап'ятковим бурситом представлені у табл. 2.

Як ми і припускали, в моделі з бурситом визначено збільшення значень напруги на всіх досліджуваних структурах. Це пов'язано зі збільшенням розмірів синовіальної бурси внаслідок запального ек-

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

седативного процесу. У випадку з досліджуваною моделлю синдрому Haglund'a ми отримали аналогічні дані (див. табл.3) – збільшення значень напруги на всіх досліджуваних структурах. При цьому в тильній флексії напруга зростає однаково як на бурсі (при синдромі Haglund'a дорівнює +215,5%, при ЗБ – +208,0%) , так і на АС (при синдромі Haglund'a та при ЗБ – +244,1% та 209,0% відповідно).

Таблиця 2

### Зведена таблиця результатів розрахунків НДС моделі з зап'ятковим бурситом у різних положеннях гомілковоступневого суглоба.

	Підошовна флексія -10°	Нейтральне положення 0°	Тильна флексія +10°
Ахіллове сухожилля, Мра	3,55	5,64	17,43
Зап'яткова bursa, Мра	2,57	5,45	16,79
Таранна кістка, Мра	2,31	2,31	5,19
П'ятковий горб, Мра	1,37	2,31	5,19

Таблиця 3

### Зведена таблиця результатів розрахунків НДС моделі із синдромом Haglund'a у різних положеннях гомілковоступневого суглоба.

	Підошовна флексія -10°	Нейтральне положення 0°	Тильна флексія +10°
Ахіллове сухожилля, Мра	5,87	7,75	26,67
Зап'яткова bursa, Мра	2,86	5,21	16,44
Таранна кістка, Мра	2,47	2,99	8,85
П'ятковий горб, Мра	2,47	2,99	8,85

Значення зростання напруження на ахілловому сухожиллі в процесі переходу з нейтрального положення у положення тильної флексії (задній поштовх) на 96,24 % більше у моделі с синдромом Haglund'a та на 68,0 % більше у моделі з бурситом в порівнянні з інтактною моделлю. Цей факт прямо вказує на зв'язок між захворюваннями навколосухожильних структур (глибока синовіальна bursa, збільшені задньо-верхні відділи п'яткової кістки — деформація Haglund'a) та захворюваннями самого АС. Результати підтверджують “стресову”

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

---

теорію розвитку тендопатії від постійного локального перенавантаження. Але різниця між зростанням показників НДС у вищезазначених положеннях стопи у обох патологічних моделях дорівнює всього 16,78%. Це означає, що як синдром Haglund'a, так і ЗБ, практично в однаковій мірі можуть впливати на розвиток супутніх вторинних дегенеративних процесів у сухожиллі і потребують уваги.

В даному дослідженні також звертає на себе увагу збільшення напруженості кісткових структур — таранної кістки і п'яtkового бугра. Це також говорить про єдність функціонування всіх структур заднього відділу стопи і неможливість протікання патологічного процесу в одних структурах без впливу на інші. В нормі реактивні репаративні процеси протікають як адаптивні з нормальними фізіологічними реакціями. При патологічних змінах вони досягатимуть рівня пристосувальних процесів з порушенням структури.

**Висновки.** В ході даного дослідження на прикладах математичних моделей були отримані результати значень НДС анатомічних структур заднього відділу стопи в різних біомеханічних умовах. Значення зростання напруження на ахілловому сухожиллі в процесі переходу з нейтрального положення у положення тильної флексії на 96,24% більше у моделі с синдромом Haglund'a та на 68,0% більше у моделі з бурситом в порівнянні з інтактною моделлю. Ми вважаємо, що це пояснює розвиток дегенеративно-дистрофічних процесів в АС при ЗБ або синдромі Haglund'a і говорить про комплексність порушення функції системи «АС-п'яtkовий горб» і неможливість ізольованого пошкодження одної частини системи без адаптаційних змін у другій. Це дозволяє більш широко поглянути на проблематику лікування і діагностики хворих з ЗБ та синдромом Haglund'a.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Haglund P. Beitrag zur Klinik der Achillessehne // Zeitschr Orthop Chir. — 1928. — № 49. — P. 49–58.
2. Reinherz R. P., Smith B. A., Henning K. E. Understanding the pathologic Haglund's deformity // J Foot Surg. — 1990. — № 29. — P. 432–435
3. Karjalainen P. T., Soila K., Aronen H. J. [et al.]. MR Imaging of Overuse Injuries of the Achilles Tendon // American Journal of Roentgenology. — 2000. — № 175(1). — P. 251–260. <https://doi:10.2214/ajr.175.1.1750251>.
4. Irwin T. A. Current Concepts Review: Insertional Achilles Tendinopathy // Foot & Ankle International. — 2010. — № 31(10). — P. 933–939. <https://doi:10.3113/fai.2010.0933>.
5. Alfredson H., & Spang C. Clinical presentation and surgical management of chronic Achilles tendon disorders- A retrospective observation on a set of consecutive patients being operated by the same orthopedic surgeon // Foot Ankle Surg. — 2018 Dec. — № 24(6). — P. 490–494. <https://doi:10.1016/j.fas.2017.05.011>.

**Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния структур задних отделов стопы на моделях стопы с запяточным бурситом и синдромом Haglund'a в разных биомеханических условиях**

**Б. С. Герасимюк, И. А. Лазарев, А. С. Мовчан, М. В. Скибан**  
Национальная медицинская академия последипломного образования имени П. Л. Шупика, г. Киев

**Резюме.** В ходе данного экспериментального исследования с помощью разработанных математических моделей были получены результаты значений напряженно-деформированного состояния анатомических структур заднего отдела стопы в различных биомеханических условиях. Значение увеличения напряжения на ахилловом сухожилии в процессе перехода из нейтрального положения в положение тыльной флексии на 96,24 % больше в модели с синдромом Haglund'a и на 68,0% больше в модели с запяточным бурситом по сравнению с интактной моделью. Это объясняет развитие дегенеративно-дистрофических процессов в ахилловом сухожилии у больных с запяточным бурситом или синдромом Haglund'a.

**Ключевые слова:** запяточный бурсит, синдром Haglund'a, тендопатия.

**Experimental study of the stress-strain state the posterior part of the foot on models of the foot with retrocalcaneal bursitis and Haglund syndrome in different biomechanical conditions**

**B. S. Herasymuk, I. A. Lazarev, O. S. Movchan, M. V. Skiban**  
Shupyk National Medical Academy of Postgraduate Education,  
Kyiv

**Abstract.** In this experimental study, using the developed mathematical models, we obtained the values of the stress-strain state of the anatomical structures of the posterior foot in different biomechanical conditions. The values of the increased stress-strain state of the Achilles tendon in the transition from the neutral position to the dorsiflexion is by 96.24% higher than in the model with Haglund's syndrome and by 68.0% higher than in the model with retrocalcaneal bursitis compared with the intact model. This clears up the development of a degenerative-dystrophic process in the Achilles tendon in patients with retrocalcaneal bursitis or Haglund's syndrome.

**Key words:** retrocalcaneal bursitis, Haglund's syndrome, Achilles tendinopathy.

**Відомості про авторів:**

**Герасимюк Богдан Степанович** — лікар ортопед-травматолог, аспірант кафедри ортопедії і травматології № 1 Національної медичної академії післядипломної освіти імені П. Л. Шупика. Адреса: м. Київ, вул. Дорогожицька, 9, тел.: +38 (044) 205-48-69.

**Лазарев Ігор Альбертович** — лікар ортопед-травматолог вищої категорії, кандидат медичних наук, завідувач лабораторією біомеханіки ДУ «Інститут травматології та ортопедії НАМН України». Адреса: м. Київ, вул. Бульварно-Кудрявська, 27, тел.: +38 (044) 486-32-03.

**Мовчан Олександр Степанович** — лікар ортопед-травматолог вищої категорії, доктор медичних наук, професор кафедри ортопедії і травматології № 1 Національної медичної академії післядипломної освіти імені П. Л. Шупика. Адреса: м. Київ, вул. Дорогожицька, 9, тел.: +38 (044) 205-48-69.

**Скибан Максим Віталійович** — інженер II категорії лабораторії біомеханіки ДУ «Інститут травматології та ортопедії НАМН України». Адреса: м. Київ, вул. Бульварно-Кудрявська, 27, тел.: +38 (044) 486-32-03.

УДК 577.114.7:577.118:582.711.713:631.576.4

## **ВИВЧЕННЯ МІНЕРАЛЬНОГО СКЛАДУ СУБСТАНЦІЙ ОТРИМАНИХ З ПЛОДІВ *PRUNUS DOMESTICA***

**Мохамед Шахм Б., Т. В. Упир, Л. В. Ленчик,  
М. А. Комісаренко**

**Національний фармацевтичний університет, м. Харків**

**Вступ.** Макро- та мікроелементи рослин мають велику реакційну здатність та можуть чинити значний вплив на організм людини, тому при розробці нових лікарських засобів з рослинної сировини доцільно дослідити їх склад.

**Мета:** дослідити мікроелементний склад субстанцій «Прунофіт» та ПСК, отриманих з плодів сливи домашньої.