

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТОПЫ ЧЕЛОВЕКА**А. И. Перепелкин, В. Б. Мандриков¹, А. И. Краюшкин, Е. С. Атрощенко***Волгоградский государственный медицинский университет,
кафедра анатомии человека, ¹кафедра физической культуры и здоровья*

Объектом исследования послужили механические характеристики стоп у здоровых юношей и девушек Волгоградского государственного медицинского университета. В данной работе рассматривается упругая деформация стопы в вертикальной плоскости, поэтому воспользовались одномерным вариантом закона Гука. Модуль упругости в этом случае является характеристикой рессорной функции стопы. В зависимости от задаваемой нагрузки на стопу, равной 50 % и 80 % массы тела, проводилось сканирование подошвенной поверхности стопы, и одновременно измерялась высота ее продольного свода. Вычисляли коэффициенты деформации, упругости и Пуассона, а также модуль Юнга. В ходе проведенного исследования было выявлено, что наибольший коэффициент деформации у лиц обоего пола отмечен вдоль вертикальной оси стопы, а наименьший — вдоль ее сагиттальной оси. Наибольший коэффициент Пуассона у лиц обоего пола был вдоль сагиттальной оси, при этом его значение у юношей было больше по сравнению с девушками. Модуль Юнга был выше у юношей.

Ключевые слова: упругость стопы, коэффициент упругости, коэффициент деформации, модуль Юнга, компьютерная плантография, юношеский возраст.

FEATURES OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF THE HUMAN FOOT**A. I. Perepelkin, V. B. Mandrikov¹, A. I. Krayushkin, E. S. Atroschenko***Volgograd State Medical University,
Department of Human Anatomy,
¹Department of physical culture and health*

The mechanical characteristics of the feet of 175 healthy (without any pathology of musculoskeletal system) young men and 315 young women of the Volgograd state medical university at the age from 17 to 21 years old were observed. The research purpose was to acquire data about the resilient characteristics of the foot under the natural conditions in young persons of both sexes. The examination of the morphofunctional condition of the foot was carried out by means of the computerized plantography, involving the systemic analysis and graphical analytical interpretation of the digital image of the foot. Scanning of the plantar surface of the foot was carried out consistently under compressive loads on each foot which were equal to 50 % and 80 % of the person's body weight. The height of the longitudinal arch of the foot was measured concurrently. Resilience coefficient, deformation coefficient, Young's module and Poisson's coefficient were calculated in both groups. The conducted research revealed that the highest deformation coefficient in the persons of both sexes was found along the vertical axis of the foot. The lowest deformation coefficient was revealed along the sagittal axis of the foot. The persons of both sexes had the greatest Poisson's coefficient along the frontal axis of the foot. Poisson's coefficient of the women foot in this axis was higher in comparison with young men. Tensile modulus or Young's modulus of the young men was greater than that of young women. The obtained data on the elasticity of the human foot make it possible to characterize its amortisation function in normal condition and the extent of its loss in various foot deformations. The proposed computerized diagnostic module and the computerized detection of morphofunctional parameters make it possible to carry out an assessment of the human foot elasticity.

Key words: foot resilience, resilience coefficient, deformation coefficient, Young's modulus, Poisson's coefficient, computerized plantography, youth age.

Врожденное и приобретенное плоскостопие является причиной многих тяжелых заболеваний опорно-двигательного аппарата, нередко приводящих к инвалидности [1]. В процессе жизни у всех людей в той или иной мере изменяются функциональные параметры стопы. В первую очередь они касаются ее рессорной и опорной функций. В связи с этим морфофункциональная диагностика состояния стоп является существенным элементом профилактики ряда нарушений опорно-двигательного аппарата [2]. Определение индивидуально-типологической изменчивости морфологии и функции здоровой стопы приобретает особую актуальность, поскольку достаточно сложно провести четкую грань между вариантами нормы стопы и начальными стадиями ее деформации с учетом пола, возраста, типа телосложения и уровня функциональной нагрузки [2].

Стопа является первым самым нагружаемым звеном опорно-двигательного аппарата. Она осуществляет контакт с опорой, перераспределяет силу реакции опоры на вышележащие сегменты и выполняет важную рессорную функцию, она обеспечивает устойчивость нижней конечности и сцепление с опорной поверхностью. Способность стопы противостоять нагрузкам обусловлена не только биомеханическим совершенством, но и свойством составляющих ее тканей [3].

Упругость стопы обусловлена индивидуальными анатомическими и функциональными особенностями, детерминированными генетическими и половыми факторами, и изменяющимися под воздействием множественных внешних факторов.

Специфическая структура стопы и голеностопного сустава служит амортизатором опорных реакций,

в норме обеспечивающая симметричную нагрузку на обе конечности и определяющая особенности ее биомеханики при ходьбе. Биомеханика стопы и функции стопы в различные фазы шага — различны. Если в фазу амортизации основная задача стопы — смягчение удара при контакте с поверхностью, то в период опоры на всю стопу — задача стопы — перераспределение энергии для эффективного выполнения следующей фазы — отталкивания от опоры. Эта фаза ставит перед стопой задачу передачи лежащим выше сегментам силы реакции опоры. Смягчение инерционной нагрузки при ходьбе и беге осуществляется сложным комплексом суставно-связочного аппарата, соединяющего 26 основных костей стопы, в котором выделяют 5 продольных и поперечный свод. Пяточная, таранная и кости плюсны и предплюсны образуют своеобразную арку — рессору, способную уплощаться и расправляться. Нагрузка массой тела распределяется равномерно на передний и задний отдел стопы. Передний и задний отделы стопы соединены в единую кинематическую цепь межсуставными связками, а также мощным эластичным сухожилием — подошвенным апоневрозом, который подобно пружине возвращает распластанный под нагрузкой свод стопы [4].

Снижение упругих и амортизирующих свойств у лиц всех возрастных групп влечет за собой повышенную ударную нагрузку и усиление вибрационных воздействий на все выше располагающиеся суставы и органы. Поэтому определение упругих характеристик стопы крайне важно в целях ранней диагностики функционального состояния ее сводов, потеря которых приводит к неблагоприятным последствиям для всего организма человека. Как в отечественной, так и зарубежной литературе не уделяется внимание особенностям упругости стопы, тогда как получение количественных характеристик ее упругих свойств позволяет, уточнив принципы профилактики заболеваний нижних конечностей, разработать комплекс специальных упражнений для повышения силы стопы [10, 11, 12].

Неразрушающим испытаниям отводится особое место в получении важных сведений о механических свойствах исследуемого элемента. Одним из таких методов является определение амортизирующих

свойств стопы путем измерения ее упругой деформации при приложении статической нагрузки.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Получение данных об упругих характеристиках стопы человека.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования послужили механические характеристики стоп 175 юношей и 315 девушек Волгоградского государственного медицинского университета в возрасте 17—21 года, не имеющих какой-либо патологии опорно-двигательного аппарата. Стопа при нормальных нагрузках испытывает упругие деформации (деформация стопы полностью исчезает при снятии нагрузки). В данной работе рассматривается упругая деформация стопы в вертикальной плоскости, поэтому воспользуемся одномерным вариантом закона Гука. Модуль упругости в этом случае будет являться характеристикой рессорной функции стопы.

Исследование морфофункционального состояния стопы осуществлялось при помощи компьютерного плантографического комплекса ООО («Ортопед», Волгоград) и включало также системный анализ и графоаналитическую расшифровку цифрового изображения стопы. В зависимости от задаваемой нагрузки на стопу, равной 50 % и 80 % массы тела, проводилось сканирование подошвенной поверхности стопы и одновременно измерялась высота ее продольного свода. Вычисляли коэффициенты деформации, упругости и Пуассона, а также модуль Юнга.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Наибольший коэффициент Пуассона у лиц обоего пола был вдоль фронтальной оси стопы, при этом его значение у девушек было больше по сравнению с юношами (табл.). Модуль Юнга был выше у юношей. В ходе проведенного исследования было выявлено, что наибольший коэффициент деформации у лиц обоего пола отмечен вдоль вертикальной оси стопы, а наименьший — вдоль ее сагитальной оси.

Основные механические характеристики стопы юношей и девушек

Ось	V_{50} , м	V_{80} , м	m_{50} , кг	m_{80} , кг	ΔV , м	Δm , кг	k , Н/м	ε %	E , кПа
юноши									
с	0,26745	0,26892	35,48	56,76	0,0015	21,28	—	0,56	—
ф	0,0897	0,0909	35,48	56,76	0,00123	21,28	—	1,37	—
в	0,0501	0,0474	35,48	56,76	-0,0027	21,28	78815	5,4	616,9
девушки									
с	0,241	0,243	29,5	47,28	0,002	17,74	—	0,83	—
ф	0,0822	0,085	29,5	47,28	0,0028	17,74	—	3,4	—
в	0,0465	0,0437	29,5	47,28	-0,0028	17,74	63357	6	601,2

Примечание. с — сагитальная ось, ф — фронтальная ось, в — вертикальная ось; V_{50} и V_{80} — высота стопы в метрах при нагрузке на нее, равной 50 и 80 % соответственно от массы тела; m_{50} — величина, равна 50 % от массы тела; m_{80} — величина, равна 80 % от массы тела; Δm — разница между 80 и 50 % величинами массы тела в кг, ΔV — разница в высоте стопы в метрах при нагрузке на нее, равной 80 и 50 % от массы тела; ε — коэффициент деформации; E — модуль Юнга; k — коэффициент упругости.

Полученные данные об упругости стопы человека позволяют охарактеризовать ее амортизирующую функцию в норме и степень ее потери при различных деформациях.

Выявленная в работе половая дифференциация коэффициента упругости стопы и адаптационного ответа на внешнюю механическую нагрузку может быть объяснима различной эластичностью и пластичностью тканей женщин и мужчин, образующих стопу, а именно кожи, связок, сухожилий и мышц. Предположительно, полученные данные можно объяснить разным влиянием половых гормонов на ткани организма человека, а именно увеличением их ригидности при преобладающем действии тестостерона [9]. Результаты нашего исследования подтверждают литературные данные, свидетельствующие о том, что упругость некоторых тканей нижних конечностей у мальчиков выше по сравнению с девочками, а также с исследованиями, в которых указывается большая подвижность в суставах нижних конечностей у лиц женского пола по сравнению с мужчинами [13].

Именно качественный и количественный состав всех тканей стопы определяет ее упругость. Так, например, выявлено, что увеличение ригидности ткани у лиц мужского пола отмечается за счет усиления синтеза коллагена, а уменьшение упругости у женщин детерминировано меньшим количеством волокон, их диаметром и относительным количеством коллагена в каждом волокне связок их стопы [7]. В то же время в исследованиях на животных женского пола в связках отмечена на 82 % большая концентрация ДНК, а у особей мужского пола — больше на 70 % содержание коллагена I типа и коллагена III типа [8].

На основании полученных нами количественных данных о половых различиях упругости стопы становится понятным более частая встречаемость повреждения подошвенных мышц и ахиллова сухожилия у мужчин [6]. В первую очередь это объясняется тем, что более ригидная ткань не может поглотить достаточную энергию с возникающей на нее нагрузкой, вследствие чего имеется высокая вероятность ее повреждения. В то же время повышенная ригидность стопы у мужчин связана со свойствами мышц и сухожилий, которые также не только качественно, но и количественно отличаются от женских мышц. Одновременно мышечное волокно у мужчин более эффективно при сопротивлении изменениям в его длине, что важно для сохранения стабильности в суставах [5].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный программно-компьютерный комплекс и программная реализация диагностики анатомо-функциональных параметров позволяют проводить оценку упругости стопы человека. Показатели стопы (модуль Юнга, коэффициенты Пуассона, упругости и деформации) характеризуют ее рессорную функцию и способность сопротивляться действию нагрузок. Таким образом, для

юношеского возраста выявлена половая дифференциация упругих специфических характеристик стопы. Разработанный метод целесообразно использовать для исследования упругих свойств стопы у лиц различных возрастных групп, спортивных специализаций, а также у больных с различными заболеваниями стоп.

ЛИТЕРАТУРА

1. Перепелкин А. И., Калужский С. И., Краюшкин А. И., Атрощенко Е. С. // Научный вестник. — 2015. — № 3 (5). — С. 77—89.
2. Перепелкин А. И., Краюшкин А. И., Атрощенко Е. С. // Журнал анатомии и гистопатологии. — 2015. — Т. 4, № 3. — С. 97.
3. Перепелкин А. И., Краюшкин А. И., Атрощенко Е. С. О методе определения упругих характеристик стопы человека / Сборник трудов научн.-практ. конф. профессор.-препод. коллектива, посвященной 80-летию Волгоградского государственного медицинского университета под редакцией академика РАН В. И. Петрова. — Изд-во ВолгГМУ, 2015. — С. 139—143.
4. Перепелкин А. И., Краюшкин А. И., Атрощенко Е. С. // Международный научно-исследовательский журнал. — 2015. — № 8 (39), ч. 3. — С. 125—128.
5. Blackburn J. T., Bell D. R., Norcross M. F., et al. // Clin. Biomech. — 2009. — Vol. 24, № 1. — P. 65—70.
6. Foure A., Cornu C., McNair P. J., Nordez A. // J. Orthop. Res. — 2012. — Vol. 30, № 5. — P. 707—712.
7. Hashemi J., Chandrashekar N., Mansouri H. et al. // J. Orthop. Res. — 2008. — Vol 26, №7. — P. 945—950.
8. Mariotti A., Rumpf D., Malakhova O., Cooper B. // Eur. J. Oral Sci. — 2000. — Vol. 108, № 5. — P. 461—463.
9. Morse C. I. // Eur. J. Appl. Physiol. — 2011. — Vol. 111, № 9. — P. 2149—2154.
10. Perepelkin A., Mandrikov V., Krayushkin A., Atroschenko K. Anatomical justification of mechanical characteristics of the human foot / Book of abstracts of the 7-th International Symposium of clinical and applied anatomy (ISCAA) (Bratislava, Slovakia, September, 2015). — Comenius university in Bratislava, 2015. — P. 83
11. Perepelkin A. I., Mandrikov V. B., Krayushkin A. I. Individual and typological characteristics of the human foot in the age aspect. Raleigh, North Carolina, USA: Lulu Press, 2015. — 175 p.
12. Perepelkin A., Mandrikov V., Krayushkin A., Atroschenko K. Mechanical characteristics of the human foot / Proceedings of the VII International Academic Congress «Innovation in the Modern World» (Australia, Sydney, 18—20 May 2015). Volume III. «Sydney University Press», 2015. — P. 87—91.
13. Shultz S. J., Pye M. L., Montgomery M. M., Schmitz R. J. // Am. J. Sports Med. — 2012. — Vol. 40, № 12. — P. 2836—2844.

Контактная информация

Перепелкин Андрей Иванович — д. м. н., профессор, профессор кафедры анатомии человека, Волгоградский государственный медицинский университет, e-mail: similipol@mail.ru