

УДК 612.76,004.0357

Р.В. Насыров

кандидат технических наук, кандидат фармацевтических наук, доцент, доцент кафедры технической кибернетики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет»

А.С. Кружков

аспирант Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет»

Т.Б. Минасов

доктор медицинских наук, доцент кафедры травматологии и ортопедии Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Башкирский государственный медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации

А.Е. Стрижков

кандидат медицинских наук, доцент, доцент кафедры анатомии человека Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Первый Московский государственный медицинский университет имени И.М. Сеченова» Министерства здравоохранения Российской Федерации (Сеченовский университет)

R.V. Nasyrov

Candidate of Tech. Sciences, Candidate of Pharm. Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technical Cybernetics at Ufa State Aviation Technical University

A.S. Kruzhkov

Graduate Student of the Ufa State Aviation Technical University

T.B. Minasov

Doctor of Medical Sciences, Associate Professor of Department of Traumatology and Orthopedy at Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Bashkir State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation

A.E. Strizhkov

Candidate of Medical Science, Docent of the Department of Human Anatomy of the Faculty of Medicine at Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education I.M. Sechenov First Moscow State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation (Sechenov University)

СПОСОБ ОЦЕНКИ ЗВУКОВОЙ ПРОВОДИМОСТИ ДЛИННЫХ ТРУБЧАТЫХ КОСТЕЙ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ БИОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРОБ

METHOD OF ESTIMATION OF SOUND CONDUCTIVITY OF LONG TUBULAR BONES ON THE BASIS OF THE METHOD OF FUNCTIONAL BIOMECHANICAL SAMPLES

КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Насыров Рашит Вильевич, кандидат технических наук, кандидат фармацевтических наук, доцент, доцент кафедры технической кибернетики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет»
 Адрес: 450 008, Уфа, ул. К. Маркса, д. 12, корп. 6
 Тел.: +7 (347) 272-74-65; e-mail: nrash@yandex.ru
Статья поступила: 23.11.2017
Статья принята: 01.12.2017

CONTACT INFORMATION

Nasyrov Rashit, Candidat of Technical Sciences, Candidat of Pharmaceutical Sciences, Associate Professor, Associate Professor Department of Technical Cybernetics at Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Ufa State Aviation Technical University»
 Address: 12/6, K. Marx str., Ufa, 450 008, Russia
 Tel.: +7 (347) 272-74-65; e-mail: nrash@yandex.ru
Article received: 23.11.2017
Article approved: 01.12.2017

Аннотация

Настоящая статья посвящена исследованию динамических характеристик длинных трубчатых костей человека в норме. Динамические характеристики в форме АЧХ и ФЧХ были получены в результате проведения экспериментов по методу функциональных биомеханических проб. Этот метод позволяет проводить исследования функционального состояния длинных трубчатых костей без привлечения рентгенологического исследова-

Abstract

This article is devoted to the study of the dynamic characteristics of long bones in norm. The dynamic characteristics in the form of AFC and PFC were obtained as the result of experiments by the method of functional biomechanical tests. This method allows the study of the functional state of long bones without the involvement of x-rays. The software Matlab and Python was used for calculations and plotting the dependencies. Practical experiments were

дования. Для расчетов и построения зависимостей были использованы программные средства Matlab и Python. Были проведены практические эксперименты на лабораторной установке, которые позволили описать динамические характеристики длинных трубчатых костей как реакции на типовые воздействия и связать их с показателями плотности костей.

Ключевые слова: функциональные биомеханические пробы, длинные трубчатые кости, функциональное состояние.

Рассмотрение структур длинных трубчатых костей [1–4], приводимое в литературе по анатомии человека, показывает наличие в отделах кости структурных компонентов, обеспечивающих их продольную и поперечную прочность. К ним относятся компактное (кортикальное) вещество средней части трубчатой кости и костные пластинки эпифизов. При этом костные пластинки пространственно организованы так, что они образуют жесткую конструкцию [1–3]. Это позволяет, несмотря на относительно слабые механические свойства губчатой костной ткани, выдерживать значительные нагрузки статического и динамического характера за счет распределения усилия сжатия и растяжения [5–8].

Совокупность костных пластинок эпифизов и компактного вещества средней части костей образует единую достаточно жесткую механическую систему. Эти же компоненты обеспечивают проводимость механических воздействий как в ударной форме, так и в форме вынуждающих механических колебаний. Таким образом, подавая тестовые воздействия на один из концов длинной трубчатой кости и снимая ответную реакцию на другом, можно оценивать характер проводимости механических воздействий и (косвенно) состояние кости в целом.

Для достижения этой цели в работе предлагается использовать метод функциональных биомеханических проб, заключающийся в организации механического воздействия на объект исследования (длинную трубчатую кость), получении реакции на такое воздействие и расчете основных характеристик.

Для определения характеристик длинных трубчатых костей была собрана исследовательская установка в составе: персональный компьютер, двухканальный управляемый цифровой осциллограф, выполняющий одновременно функции аналого-цифрового преобразователя, управляемый генератор синусоидальных сигналов, устройство формирования воздействия для тестирования костной проводимости, в качестве датчика выступал чувствительный микрофон с усилителем. В качестве программных средств управления использован мо-

conducted using laboratory equipment, which allowed to describe the dynamic properties of long bones as a response to a typical impact and to relate them to the parameters of bone density.

Keywords: functional biomechanical tests, long bone, functional state.

дуль управления на языке Python. Для обработки сигналов были разработаны программные модули для среды Matlab.

Для проведения пилотного исследования была отобрана группа лиц в возрастной группе 20–25 лет примерно одинаковой комплекции и анатомической конституции. Исследование проводилось на локтевой кости правой руки как наиболее простой и доступной. Над одним из диафизов на поверхности закреплялось устройство костной проводимости, на другом конце кости — микрофон. Периодическое воздействие подавалось на устройство костной проводимости последовательно на частотах, сдвигаемых в сторону возрастания с одинаковым шагом.

В результате исследования были получены оцифрованные данные, представляющие собой реакции на гармоническое воздействие. По форме полученные кривые представляли собой квазипериодические функции времени. Поскольку измерения проводились на определенном диапазоне частот, то следующим шагом методики исследования было вычисление среднего значения огибающей амплитуды и фазы получаемых сигналов. В качестве оценки амплитуды принималось максимальное значение реакции на тестовое воздействие. Для расчета сдвига фазы использовалась методика, приведенная в работе [9]. Суть методики расчета фазового сдвига заключалась в минимизации величины ошибки

$$\varepsilon = \sum_{n=0}^{N-1} (x(t_n) - C_0 \sin(\omega_0 t_n) - C_2 \cos(\omega_0 t_n))^2 \quad (1)$$

и последующем вычислении фазы

$$\varphi = \arctg\left(-C_0/C_1\right) + \left(1 - \operatorname{sgn}(C_0)\right)\pi/2 \quad (2)$$

для исходного сигнала и реакции. Разность между полученными значениями фаз дает величину фазового сдвига.

Применение приведенных соотношений позволило рассчитать величины фазового сдвига для ка-

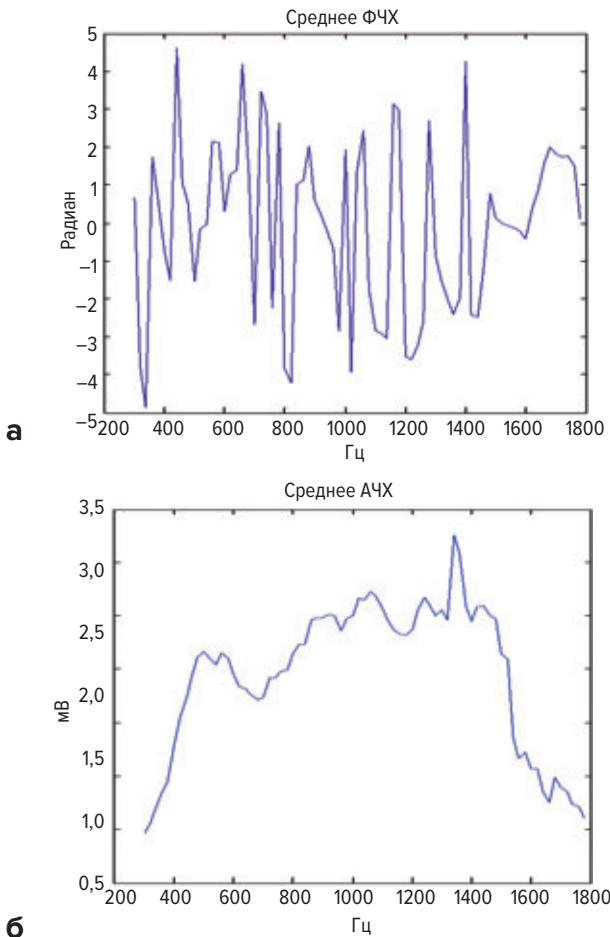


РИС. 1. ФЧХ и АЧХ принятых сигналов

ждой из частот тестового сигнала. Совокупность таких значений позволяет построить эмпирические зависимости амплитуд и фаз от частот. Представив огибающие на графике, получим ФЧХ и АЧХ длинной трубчатой кости человека (рис. 1).

Известно [10], что максимальное значение амплитуды при переходе фазы сигнала через ноль соответствует резонансной частоте продольных колебаний, при этом фазовая скорость определяется как

$$c_{\text{прод}} = \lambda f_1 = 2L f_1. \quad (3)$$

Для фазовой скорости так справедливо соотношение:

$$c_{\text{прод}} = \sqrt{E / \rho}. \quad (4)$$

Это дает

$$\rho = E / (2L f_1)^2. \quad (5)$$

Таким образом, зная частоту резонанса, длину трубчатой кости и полагая модуль Гука постоянным, можно оценить плотность костной ткани.

Для полученных результатов на АЧХ определяем максимум, соответствующий частоте $f = 1340$ Гц. Используя преобразованное выражение для частоты главная частота, эквивалентное выражению (3), получим $c = 2 * 1340 * 0,28 = 750,4$ м/с. Используя известное выражение $c = \sqrt{E / \rho}$, преобразуем его для оценки плотности $\rho = E / c^2$, получим при среднем значении $E = 10^{10}$ Па: $\rho = 10^{10} / 750,4^2 = 1810,3$ кг/м³, что соответствует известным данным [11].

Таким образом, предложенный способ оценки звуковой проводимости может быть использован для оценки звуковой проводимости длинных трубчатых костей человека.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-48-020074/17.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Билич Г.Л., Николенко В.Н. Атлас анатомии человека: в 3 т.: учебное пособие. Т. 1. Ростов на Дону: Феникс, 2014.
[Bilich G.L., Nikolenko V.N. Atlas of human anatomy: in 3 vols.: textbook. Т. 1 Rostov na Donu: Phoenix, 2014 (In Russian).]
2. Сапин М.Р., Никитюк Д.Б., Николенко В.Н., Чава С.В. Анатомия человека: учебник: в 2 т. Т. 1. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2012.
[Sapin M.R., Nikityuk D.B., Nikolenko V.N., Chava S.V. Human Anatomy: Textbook: In 2 volumes. Т. 1. М.: GEO-TAR-Media, 2012 (In Russian).]
3. Николенко В.Н., Сперанский В.С. Анатомия человека с элементами гистологии: учебник для студентов факультетов высшего сестринского образования. М.: Издательский центр «Академия», 2008.
[Nikolenko V.N., Speransky V.S. Human Anatomy with Elements of Histology: A Textbook for Students of the Faculties of Higher Nursing Education. М.: Publishing Center «Academy», 2008 (In Russian).]
4. Удочкина Л.А. Влияние серосодержащих газов на постнатальный онтогенез трубчатых костей: автореф. дис. ... канд. мед. наук. Санкт-Петербург, 1997.
[Udochkina L.A. Influence of sulfur-containing gases on the postnatal ontogenesis of tubular bones. The dissertation author's abstract on competition of a scientific degree of the candidate of medical sciences. St. Petersburg, 1997 (In Russian).]
5. Online anatomy of Gray [electronic resource]. URL: <http://www.bartleby.com/107/illus251.html>
6. Деревцова С.Н., Штейнердт С.В., Ачкасов Е.Е. Сравнительная оценка гониометрических исследований суставов конечностей мужчин и женщин различных соматотипов. Спортивная медицина: наука и практика. 2013; 4: 50–54.
[Derevtsova S.N., Steinerdt S.V., Achkasov E.E. Comparative evaluation of goniometric studies of the joints of the extremities of men and women of different somatotypes. Sports medicine: science and practice. 2013; 4: 50–54 (In Russian).]

7. Серeda А.П., Белякова А.М. Хирургическое лечение синдрома задней пяточной боли у спортсменов. Спортивная медицина: наука и практика. 2016; 6(4): 35–41.
[Sereda A.P., Belyakova A.M. Surgical treatment of back pain syndrome in athletes. Sports medicine: science and practice. 2016; 6(4): 35–41 (In Russian).]
8. Воронцова О.И., Удочкина Л.А., Мазин И.Г., Гончарова Л.А. Цикл движения верхних конечностей при нормальной ходьбе человека. Медицинский вестник Башкортостана. 2016; 11(6): 53–58.
[Vorontsov O.I., Udochkina L.A., Mazin I.G., Goncharova L.A. The cycle of movement of the upper limbs with normal walking of a person. Medical bulletin of Bashkortostan. 2016; 11(6): 53–58 (In Russian).]
9. Игнатъев В.К., Никитин А.В., Юшанов С.В. Измерение фазового сдвига квазигармонических сигналов. Вычислительные методы и программирование. 2013; 14: 424–431.
[Ignatiev V.K., Nikitin A.V., Yushanov S.V. Measurement of the phase shift of quasiharmonic signals. Computational methods and programming. 2013; 14: 424–431 (In Russian).]
10. Красильников В.А., Звуковые волны в воздухе, воде и твердых телах. М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1954.
[Krasilnikov V.A. Sound waves in air, water and solids. Moscow: State Publishing House of Technical and Theoretical Literature, 1954 (In Russian).]
11. Хлусов И.А., Пичугин В.Ф., Рябцева М.А. Основы биомеханики биосовместимых материалов и биологических тканей: учебное пособие. Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2007.
[Khlusov I.A., Pichugin V.F., Ryabtseva M.A. Fundamentals of biomechanics of biocompatible materials and biological tissues: textbook. Tomsk: Tomsk Polytechnic University, 2007 (In Russian).]