

Иванов Д. В.

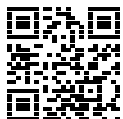
ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГУБЧАТОЙ КОСТИ НА ОСНОВЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ОДНООСНОМУ СЖАТИЮ

Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени
Н. Г. Чернышевского, Саратов, Россия

Аннотация. Работа посвящена определению механических свойств губчатой кости по данным экспериментов на одноосное сжатие и разработке подходов, обеспечивающих сопоставимость и воспроизводимость получаемых характеристик. Актуальность исследования связана с необходимостью корректной оценки эффективного модуля упругости и других механических параметров губчатой кости для задач биомеханики, математического моделирования и интерпретации данных лучевой диагностики. В докладе рассматриваются серии экспериментов, выполненных на образцах губчатой кости крупного рогатого скота из позвонков и области коленного сустава, а также на образцах губчатой кости детских позвонков. Испытания проводились в условиях одноосного сжатия с использованием универсальных испытательных машин; для части серий дополнительно оценивались минеральная плотность кости, пористость и коэффициент Пуассона. Одним из центральных вопросов исследования являлась разработка требований к геометрии образцов для испытаний на сжатие. Показано, что величина эффективного модуля упругости существенно зависит от соотношения высоты и поперечного размера образца, тогда как при достижении определённого диапазона относительной высоты оценка модуля стабилизируется. Отдельно исследовано влияние способа нагружения, включая испытания без заглушек, а также с пластиковыми и алюминиевыми заглушками. Установлено, что при соблюдении геометрических требований различия, обусловленные способом передачи нагрузки, не являются определяющими. Для различных направлений вырезки образцов получены значения эффективного модуля упругости, минеральной плотности и коэффициента Пуассона, что позволило оценить анизотропию механического отклика губчатой кости. Построены зависимости между модулем упругости и минеральной плотностью, а также между модулем упругости и пористостью; показано, что эти зависимости могут быть использованы для расчётной оценки механических характеристик по структурным параметрам. Также рассмотрен вопрос межлабораторной надёжности экспериментов по одноосному сжатию, и продемонстрирована согласованность результатов, полученных в разных лабораториях. Для губчатой кости детских позвонков получены зависимости между нормализованным эффективным модулем упругости и рентгеновской плотностью, представляющие интерес для клинических и расчётных приложений. Полученные результаты могут быть использованы при построении биомеханических моделей костных структур и при разработке методик оценки свойств костной ткани по данным визуализации.

Ключевые слова: губчатая кость, одноосное сжатие, модуль упругости, минеральная плотность кости, пористость, коэффициент Пуассона, анизотропия, позвонки, биомеханика.

Иванов Дмитрий Валерьевич, доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры математической теории упругости и биомеханики; e-mail: ivanovdv.84@ya.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1640-6091>; AuthorID: 201794



для цитирования: Иванов Д. В. Об определении механических свойств губчатой кости на основе экспериментов по одноосному сжатию // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И.Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2026. № 1(67). С. 208–212. DOI: 10.37972/chgpu.2026.67.1.012. EDN: VQZTJP

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0).

D. V. Ivanov

ON DETERMINING THE MECHANICAL PROPERTIES OF TRABECULAR BONE FROM UNIAXIAL COMPRESSION TESTS

Saratov State University, Saratov, Russia

Abstract. The influence of the relative height of the specimen on the effective elastic modulus of bovine knee joint cancellous bone, calculated using rod theory, was investigated. The modulus was evaluated under direct load application to the specimen, as well as with plastic and aluminum end caps glued to its ends. Regression relationships linking bone mineral density and its effective elastic modulus were established. It was found that when the relative height of the specimen is at least 5 units, it ceases to influence the elastic modulus. It was shown that under uniaxial compression of long specimens, the loading method does not affect the effective elastic modulus. It was obtained that the relationship between the effective elastic modulus and mineral density is independent of the specimen loading method, provided its relative height is at least 5 units. An analysis of the inter-laboratory reliability of uniaxial compression experiments on cancellous bone was performed. Experiments involving uniaxial compression of bovine vertebral cancellous bone were conducted in two biomechanics laboratories, and relationships between the elastic modulus and volumetric bone mineral density were established. The effective elastic moduli and their dependence on volumetric mineral density, obtained from the experiments in the different laboratories, were compared. The elastic moduli of cancellous bone tissue obtained in the different laboratories were statistically indistinguishable. The corresponding dependencies of the effective elastic modulus on volumetric mineral density for the experiments conducted in the two laboratories were also identical. The results of the study can be used in developing a standard for uniaxial compression testing of cancellous bone. Further research in this direction may focus on evaluating bone elastic moduli in cases of anisotropy, as well as on determining the mechanical characteristics of bone for new (e.g., micropolar) models of bone tissue.

Keywords: trabecular bone, uniaxial compression, elastic modulus, bone mineral density, porosity, Poisson's ratio, anisotropy, vertebrae, biomechanics.

Dmitry V. Ivanov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Mathematical Theory of Elasticity and Biomechanics; e-mail: ivanovdv.84@ya.ru; <https://orcid.org/0000-0003-1640-6091>; AuthorID: 201794



to cite this article: Ivanov D.V. On determining the mechanical properties of trabecular bone from uniaxial compression tests // Vestn. Chuvash. Gos. Ped. Univ. im. I.Ya. Yakovleva Ser.: Mekh. Pred. Sost. 2026. No 1(67). p. 208–212. DOI: 10.37972/chgpu.2026.67.1.012

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

ДОПОЛНИТЕЛЬНО

Вклад авторов. Д. В. Иванов: постановка задачи, анализ литературы, интерпретация результатов, подготовка текста рукописи.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Работа выполнена при поддержке Благотворительного фонда Владимира Потанина (проекты № ГК24-000076, ПР24-000188) и государственного задания, проект FSRR-2023-0009.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. D. V. Ivanov formulated the research problem, analyzed the literature, interpreted the results, and prepared the manuscript.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding. The work was supported by the Vladimir Potanin Foundation (projects No. GK24-000076, PR24-000188) and by the state assignment, project FSRR-2023-0009.

ЛИТЕРАТУРА

1. Экспериментальное исследование механических характеристик губчатой кости позвонков пациентов возрастной группы 2–5 лет / Д. А. Сидоренко [и др.] // Российский журнал биомеханики. – 2025. – Т. 29, № 2. – С. 49–59.
2. К вопросу об изучении структурных и механических характеристик губчатой костной ткани крупного рогатого скота / И. Ф. Паршина [и др.] // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Математика. Механика. Информатика. – 2025. – Т. 25, № 2. – С. 231–245.
3. On the question of the effect of the loading method on the cancellous bone effective elasticity modulus / I. F. Parshina [et al.] // Mechanics of Solids. – 2024. – Vol. 59, no. 7. – P. 3870–3879.
4. Experimental study of cancellous vertebral bone mechanical characteristics in patients aged 2–5 years / D. Sidorenko [et al.] // Russian Journal of Biomechanics. – 2025. – Vol. 29, no. 2. – P. 39–48.
5. Standardizing compression testing for measuring the stiffness of human bone / S. Zhao [et al.] // Bone Joint Research. – 2018. – Vol. 7, no. 8. – P. 524–538. – DOI: 10.1302/2046-3758.78.BJR-2018-0025.R1.

Received: 10.03.26;

accepted: 19.05.26;

published: 01.07.26.

6. Theoretical analysis of the experimental artifact in trabecular bone compressive modulus / T. M. Keaveny [et al.] // *Journal of Biomechanics*. – 1993. – Vol. 26, no. 4/5. – P. 599–607. – DOI: 10.1016/0021-9290(93)90021-6.
7. Trabecular bone modulus and strength can depend on specimen geometry / T. M. Keaveny [et al.] // *Journal of Biomechanics*. – 1993. – Vol. 26, no. 8. – P. 991–1000. – DOI: 10.1016/0021-9290(93)90059-N.
8. *Morgan E. F., Bayraktar H. H., Keaveny T. M.* Trabecular bone modulus-density relationships depend on anatomic site // *Journal of Biomechanics*. – 2003. – Vol. 36, no. 7. – P. 897–904. – DOI: 10.1016/S0021-9290(03)00071-X.

REFERENCES

1. Eksperimental'noe issledovanie mekhanicheskikh kharakteristik gubchatoi kosti pozvonkov patsientov vozrastnoi gruppy 2-5 let [Experimental study of the mechanical characteristics of vertebral cancellous bone in patients aged 2-5 years] / D. A. Sidorenko [et al.] // *Rossiiskii zhurnal biomekhaniki* [Russian Journal of Biomechanics]. – 2025. – Vol. 29, no. 2. – P. 49–59. – (In Russian).
2. K voprosu ob izuchenii strukturnykh i mekhanicheskikh kharakteristik gubchatoi kostnoi tkani krupnogo rogatogo skota [On the study of structural and mechanical characteristics of bovine cancellous bone tissue] / I. F. Parshina [et al.] // *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya: Matematika. Mekhanika. Informatika* [Izvestiya of Saratov University. New Series. Series: Mathematics. Mechanics. Informatics]. – 2025. – Vol. 25, no. 2. – P. 231–245. – (In Russian).
3. On the question of the effect of the loading method on the cancellous bone effective elasticity modulus / I. F. Parshina [et al.] // *Mechanics of Solids*. – 2024. – Vol. 59, no. 7. – P. 3870–3879.
4. Experimental study of cancellous vertebral bone mechanical characteristics in patients aged 2-5 years / D. Sidorenko [et al.] // *Russian Journal of Biomechanics*. – 2025. – Vol. 29, no. 2. – P. 39–48.
5. Standardizing compression testing for measuring the stiffness of human bone / S. Zhao [et al.] // *Bone Joint Research*. – 2018. – Vol. 7, no. 8. – P. 524–538. – DOI: 10.1302/2046-3758.78.BJR-2018-0025.R1.
6. Theoretical analysis of the experimental artifact in trabecular bone compressive modulus / T. M. Keaveny [et al.] // *Journal of Biomechanics*. – 1993. – Vol. 26, no. 4/5. – P. 599–607. – DOI: 10.1016/0021-9290(93)90021-6.
7. Trabecular bone modulus and strength can depend on specimen geometry / T. M. Keaveny [et al.] // *Journal of Biomechanics*. – 1993. – Vol. 26, no. 8. – P. 991–1000. – DOI: 10.1016/0021-9290(93)90059-N.
8. *Morgan E. F., Bayraktar H. H., Keaveny T. M.* Trabecular bone modulus-density relationships depend on anatomic site // *Journal of Biomechanics*. – 2003. – Vol. 36, no. 7. – P. 897–904. – DOI: 10.1016/S0021-9290(03)00071-X.