

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

**«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ  
Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»**

Кафедра математической теории упругости и биомеханики

---

**Определение механических и структурных свойств  
губчатой костной ткани**

---

**АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ**

студента 4 курса 431 группы

направления 01.03.03 – Механика и математическое моделирование

---

механико-математического факультета

---

Токарева Дмитрия Антоновича

---

Научный руководитель  
доцент, к.ф.-м.н., доцент

А.В. Доль

Зав. кафедрой  
зав. кафедрой, д.ф.-м.н., профессор

Л.Ю. Коссович

Саратов 2025

## ВВЕДЕНИЕ

Губчатая (трабекулярная) костная ткань является ключевым структурным компонентом скелета, обеспечивающим механическую прочность, амортизацию и адаптацию к динамическим нагрузкам. Её уникальная ячеистая структура, состоящая из сети трабекул, определяет не только устойчивость кости к деформациям, но и её роль в метаболических процессах. Однако, несмотря на значительное количество исследований в области биомеханики костной ткани, остаются нерешенными вопросы, связанные с точностью определения её механических характеристик, таких как модуль Юнга и коэффициент Пуассона, в зависимости от геометрии исследуемых образцов.

В настоящее время стандарты испытаний на сжатие для материалов (например, пластмасс или металлов) строго регламентируют соотношение размеров образцов. Однако для биологических тканей, в частности для губчатой кости, подобные стандарты отсутствуют. Это приводит к тому, что в различных исследованиях используются образцы с сильно различающимися геометрическими параметрами, что затрудняет сопоставление полученных данных и снижает достоверность результатов.

Таким образом, разработка методики, позволяющей стандартизировать испытания образцов губчатой костной ткани с учётом их геометрических параметров, представляет собой важную научную и практическую задачу. Решение этой задачи позволит повысить точность биомеханических моделей, улучшить диагностику заболеваний костной системы и оптимизировать методы хирургического лечения.

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. В первой главе представлены результаты анализа литературы по тематике исследования. Во второй главе описана методика подготовки образцов губчатой кости. В третьей главе представлена методика подготовки образцов губчатой кости. В третьей главе представлена методология проведенных экспериментов по сжатию костей и их обжигу в муфельной печи для оценки их

механических и структурных свойств. Четвертая глава содержит анализ результатов экспериментов, а также исследование построенных зависимостей между механическими и структурными свойствами кости.

## СОДЕРЖАНИЕ

В **первой главе** был проведен анализ современных исследования механических свойств губчатой костной ткани. Отмечено, что большинство работ не учитывают влияние геометрических параметров образцов на результаты испытаний. Также был выявлен недостаток стандартизированных методов для биологических тканей. Особое внимание уделено методам оценки пористости и минеральной плотности, включая использование микро-КТ.

Во **второй главе** были подготовлены образцы из позвонков крупного рогатого скота в трех направлениях (X, Y, Z) (рисунок 1) с последующей обработкой для достижения формы параллелепипеда.

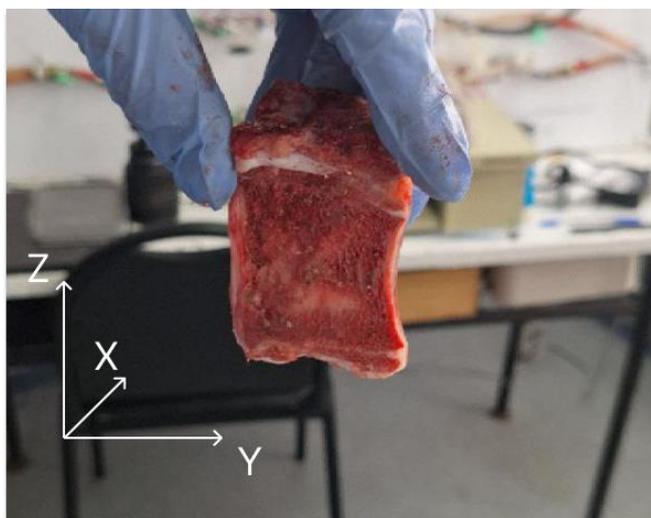


Рисунок 1 – Исходной позвонок

Изначально из позвонков были выпилены образцы вдоль оси тела (ось Z) и потом во двух взаимно перпендикулярных направлениях (ось Y и X соответственно) в соответствии с рисунком 1. Таким образом получилось 3 группы образцов, которые были расфасованы по пакетам-слайдерам с замком zip lock, соответствующие каждому направлению

В **третьей главе** проводились эксперименты для определения механических и структурных свойств образцов. Эксперименты проводились на

универсальной испытательной машине Instron-3342 с нагрузочной ячейкой 500 Н, скорость нагружения равнялась 2 мм/мин с регистрацией поперечных перемещений при помощи микрометра Mitutoyo с разрешением 0.001 мм. В таблице 2 представлены полученные значения модуля Юнга для продольных образцов.

Таблица 2 – Значения модулей Юнга для образцов в направлении оси Z

| Длина,<br>мм | Модуль<br>Юнга, МПа |
|--------------|---------------------|
| 43,6         | 472,71983           |
| 41,9         | 595,52277           |
| 42,46        | 712,16613           |
| 37,6         | 664,49779           |
| 27,6         | 594,8964            |
| 37,3         | 914,10307           |
| 29,1         | 580,54578           |
| 21,2         | 387,14374           |
| 19,7         | 591,26264           |
| 14,6         | 379,91401           |
| 18,4         | 388,18616           |
| 14           | 267,91896           |
| 16,9         | 101,03761           |

Обработку и анализ данных эксперимента выполнены с использованием Microsoft Excel. Сюда входит упорядочение исходных данных измерений, обработка полученных данных, таких как геометрические параметры, модуль Юнга, продольные и поперечные перемещения, а также их оценка. Также были построены графики для представления результатов образцов.

Коэффициент Пуассона определяется по следующей формуле:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_{\text{попереч}}}{\varepsilon_{\text{продол}}}, \varepsilon_{\text{попереч}} = \frac{\Delta d}{d_0}, \varepsilon_{\text{продольные}} = -\frac{\Delta l}{l_0},$$

где  $\varepsilon_{\text{попереч}}$  - поперечные деформации,  $\varepsilon_{\text{продол}}$  - продольные деформации,  $\Delta d$  – поперечное сжатие,  $d_0$  - поперечный размер образца,  $\Delta l$  – продольное удлинение (до деформации),  $l_0$  - длина образца (до деформации).

По этой формуле полученные значения были показаны в таблице 3.

Таблица 3 – Значения коэффициента Пуассона

| Образцы по оси Z |                         | Образцы по оси Y |                         | Образцы по оси X |                         |
|------------------|-------------------------|------------------|-------------------------|------------------|-------------------------|
| Длина,<br>мм     | Коэффициент<br>Пуассона | Длина,<br>мм     | Коэффициент<br>Пуассона | Длина,<br>мм     | Коэффициент<br>Пуассона |
| 43,6             | 0,24                    | 25,48            | 0,08                    | 21,2             | 0,013                   |
| 41,9             | 0,18                    | 19,2             | 0,01                    | 20,7             | 0,046                   |
| 42,46            | 0,17                    | 22,76            | 0,22                    | 21,6             | 0 перемещ.              |
| 37,6             | 0,4                     | 10,5             | 0,15                    | 15,7             | 0,0101                  |
| 27,6             | 0,3                     | 19,43            | 0,006                   | 19,7             | 0 перемещ.              |
| 37,3             | 0,3                     | 18,3             | 0,02                    | 17,5             | 0 перемещ.              |
| 29,1             | 0 перемещ.              | 28,4             | 0 перемещ.              | 15,1             | 0,0184                  |
| 21,2             | 0,13                    | 14,7             | 0 перемещ.              | 16,3             | 0 перемещ.              |
| 19,7             | 0,4                     | 19,4             | 0,06                    | 15,7             | 0,0356                  |
| 14,6             | 0,03                    | 19,2             | 0 перемещ.              | 14,7             | 0,0106                  |
| 18,4             | 0,445                   | 13,9             | 0,11                    | 11,1             | 0 перемещ.              |
| 14               | 0 перемещ.              | 16,8             | 0 перемещ.              | 14,5             | 0 перемещ.              |
| 16,9             | 0 перемещ.              | Н/Д              | Н/Д                     | 14,5             | 0,007                   |
| Н/Д              | Н/Д                     | Н/Д              | Н/Д                     | 7,6              | 0 перемещ.              |

Данные для построения зависимостей коэффициента Пуассона от длины образцов для двух поперечных направлений не использовались, так как

значение коэффициента Пуассона для них очень мало, скорее всего, из-за относительно небольшой длины образцов по сравнению с продольными.

Для подсчета минеральной плотности каждый образец предварительно обжигался в муфельной печи. Минеральная плотность костной ткани (МПК) рассчитывалась по следующей формуле:

$$\rho_{\text{карк}} = \frac{m_{\text{dry}}}{V_{\text{общ}} - V_{\text{пор}}}, V_{\text{общ}} = a * b * c, V_{\text{пор}} = \frac{m_{\text{alc}}}{\rho_{\text{alc}}}, m_{\text{alc}} = m_{\text{soaked}} - m_{\text{dry}}.$$

Далее необходимо было измерить пористость образцов. Пористость рассчитывалась по следующей формуле:

$$P = \frac{V_{\text{пор}}}{V_{\text{общ}}} * 100\%,$$

где  $P$  – пористость, выраженная в процентах,  $V_{\text{пор}}$  – объем пор внутри образца,  $V_{\text{общ}}$  – общий объем образца.

Данная формула будет отражать долю образца, занятую порами. Таким образом получим количественную меру того, насколько пористой является структура.

В **четвертой главе** был проведен анализ полученных результатов и построение зависимостей между механическими и структурными параметрами.

В результате анализа данных, полученных в ходе испытания образцов на одноосное сжатие, была установлена следующая зависимость между модулем Юнга и отношением длины к минимальному размеру поперечного сечения образцов, в соответствии с рисунком 2.



Рисунок 2 – Зависимость модуля Юнга от соотношения у продольных образцов (ось Z)

Таким образом, получили, что у продольных образцов (ось Z), начиная с соотношения 1:5,5, геометрические параметры перестают оказывать влияние на результаты эксперимента на сжатие.

В рамках нашего исследования были проведены измерения коэффициента Пуассона с помощью измерения продольных и поперечных перемещений. Но данной выборки было недостаточно, чтобы проследить какую-либо зависимость коэффициента Пуассона от высоты образцов. Но полученные данные соответствуют проводимыми по этой теме исследованиями других авторов.

Для оценки возможной взаимосвязи между модулем Юнга и МПК были проанализированы полученные экспериментальные данные продольных образцов. На основе этих данных была построена соответствующая зависимость (рисунок 3), целью которой было показать, оказывает ли влияние содержание минеральных компонентов в образце на модуль Юнга.

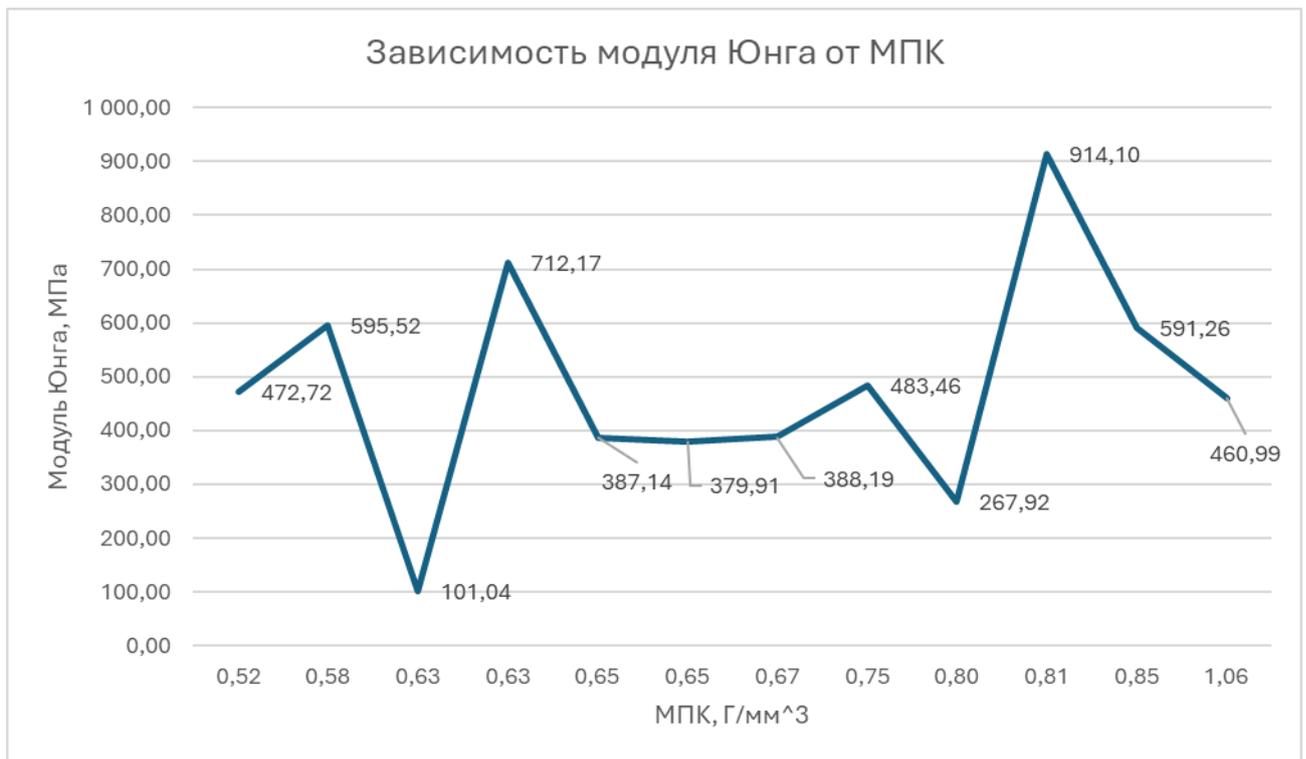


Рисунок 3 – График зависимости модуля Юнга от МПК

Проанализировав полученную зависимость, не удалось установить какие-либо корреляции между модулем Юнга и МПК. Это может быть связано с неточностью исследования.

Последним объектом нашего исследования стала пористость и ее влияние на модуль Юнга образцов.

Проанализировав полученную зависимость, получили следующий график в соответствии с рисунком 24.



Рисунок 4 – График зависимости модуля Юнга от пористости у продольных образцов

На представленном графике наблюдается тенденция к снижению модуля Юнга при росте пористости, а именно, начиная с приблизительно 53%, модуль Юнга стремительно падает, что логично, ведь материала становится меньше и больше пустоты.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Образцы трабекулярной кости были подготовлены позвонков костей крупного рогатого скота. После завершения полного набора экспериментальных процедур были получены следующие результаты.

Во-первых, было обнаружено, что начиная с соотношения высоты к минимальному размеру поперечного сечения приблизительно 1:5,5, геометрические параметры образцов больше не оказывали существенного влияния на результаты испытаний на одноосное сжатие. Это говорит о том, что образцы с такими пропорциями можно считать приближающимися к одноосному напряженному состоянию.

Во-вторых, из-за ограниченного количества доступных образцов не удалось оценить потенциальную связь между коэффициентом Пуассона и высотой образца. Для получения статистически надежных выводов в этой области потребовался бы больший размер выборки.

В-третьих, анализ связи между минеральной плотностью костной ткани (МПК) и механическими свойствами образцов не выявил какой-либо четкой корреляции. В рамках данного исследования не было выявлено существенного влияния МПК на модуль Юнга или коэффициент Пуассона.

Наконец, что касается пористости, было отмечено, что как только пористость превысила приблизительно 53%, произошло заметное снижение модуля Юнга. Это соответствует общему пониманию того, что высокая пористость существенно ослабляет механическую прочность трабекулярной кости.