

ТЕЗИСЫ ДОКЛАДОВ

МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

«Физическая мезомеханика.

Материалы с многоуровневой иерархически
организованной структурой и интеллектуальные
производственные технологии»

6–10 сентября 2021 г.

Томск, Россия

DOI: 10.17223/978-5-907442-03-0-2021-357

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ ПОРИСТЫХ ФЛЮИДОНАСЫЩЕННЫХ БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ ПРИ ОДНООСНОМ СЖАТИИ

Лапшина А.А.

*Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск
Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск*

Наиболее распространенные заболевания, приводящие к инвалидности, это заболевания, поражающие суставы, костные и хрящевые ткани (в первую очередь, остеоартрит и остеопороз). Для лечения таких функциональных нарушений, приводящих к снижению прочности костной ткани, наиболее эффективно использовать совместно медикаментозное и немедикаментозное лечение (лечебная физкультура) [1]. Однако в настоящее время для установления оптимальных физических нагрузок теоретических данных недостаточно. Так как проведение экспериментального анализа, особенно на живых костных тканях, встречает большие технические и этические ограничения. Поэтому высока актуальность проведения компьютерного анализа динамики изменения напряженного состояния костных тканей человека, а также оценки их эффективных механических характеристик при различных видах двигательной активности и динамики перераспределения костной жидкости.

Целью данной работы являлось численное изучение механического поведения пористой флюидонасыщенной костной ткани при динамическом нагружении и получение оценок динамических значений ее механических характеристик. В качестве динамического нагружения было выбрано одноосное сжатие.

При проведении тестовых расчетов была использована модель пороупругой среды, реализованная в рамках численного метода подвижных автоматов (МПА) [2]. Моделировалось механическое поведение кубических образцов губчатой и кортикальной костных тканей, поровое пространство которых было заполнено биологической жидкостью. Образцы подвергались одноосному сжатию с различными скоростями. Длина стороны кубического образца была равна 5 см.

В расчетах использовались следующие значения параметров губчатой костной ткани: плотность $\rho = 600 \text{ кг/м}^3$, модуль сдвига $G = 1,32 \text{ ГПа}$, модуль упругости $K = 3,3 \text{ ГПа}$, предел прочности материала на сжатие 35 МПа, открытая пористость 80%, значения проницаемости варьировались в пределах от $8 \cdot 10^{-3} \text{ Да}$ до $2 \cdot 10^{-1} \text{ Да}$.

При моделировании кортикальной костной ткани использовались значения параметров: плотность $\rho = 1850 \text{ кг/м}^3$, модуль сдвига $G = 5,547 \text{ ГПа}$, модуль упругости $K = 14 \text{ ГПа}$, предел прочности на сжатие 100 МПа, открытая пористость 4%, значения проницаемости варьировались в пределах от $4 \cdot 10^{-4} \text{ Да}$ до $4 \cdot 10^{-2} \text{ Да}$.

Характеристики биологической жидкости: плотность $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$, модуль упругости $K = 2,3 \text{ ГПа}$, коэффициент динамической вязкости $\eta = 2,85 \text{ мПа}\cdot\text{с}$.

В ходе исследования определялись зависимости прочности на сжатие и модуля Юнга образцов от величины проницаемости костной ткани и скорости деформации сжатия.

Результаты моделирования позволили установить логистический характер зависимости прочностных характеристик и модуля Юнга костных тканей от величины скорости деформации и проницаемости. Показано, что зависимости прочности и модуля Юнга губчатой и кортикальной костной ткани от скорости деформации, проницаемости, поперечного размера образцов и вязкости костной жидкости могут быть описаны единой (калибровочной) кривой (см. рис. 1), где в качестве аргумента используется безразмерный динамический параметр – аналог числа Дарси (1):

$$Da = \epsilon k W^2 / \eta P_0 \quad (1)$$

Здесь ϵ – скорость деформации, η – вязкость поровой жидкости, W – полуширина образца, k – проницаемость, P_0 – давление на боковых поверхностях образца ($P_0 = 10^5 \text{ Па}$).

Установленный логистический характер зависимости динамических механических характеристик костных тканей от данного безразмерного параметра является интегральным результатом конкуренции противонаправленных процессов: 1) роста объемных напряжений в каркасе вследствие сжатия порового пространства и содержащейся в нем жидкости; 2) снижения объемных напряжений вследствие фильтрации поровой жидкости и ее оттока из образца через боковые поверхности. Срединная точка логистической зависимости отвечает характерному значению параметра Da , при котором характерные скорости процессов деформирования и фильтрации равны.

Полученные обобщенные кривые могут использоваться для прогнозирования и оценки динамических значений механических характеристик губчатой и кортикальной тканей различных костей при различных режимах двигательной активности человека и животных.

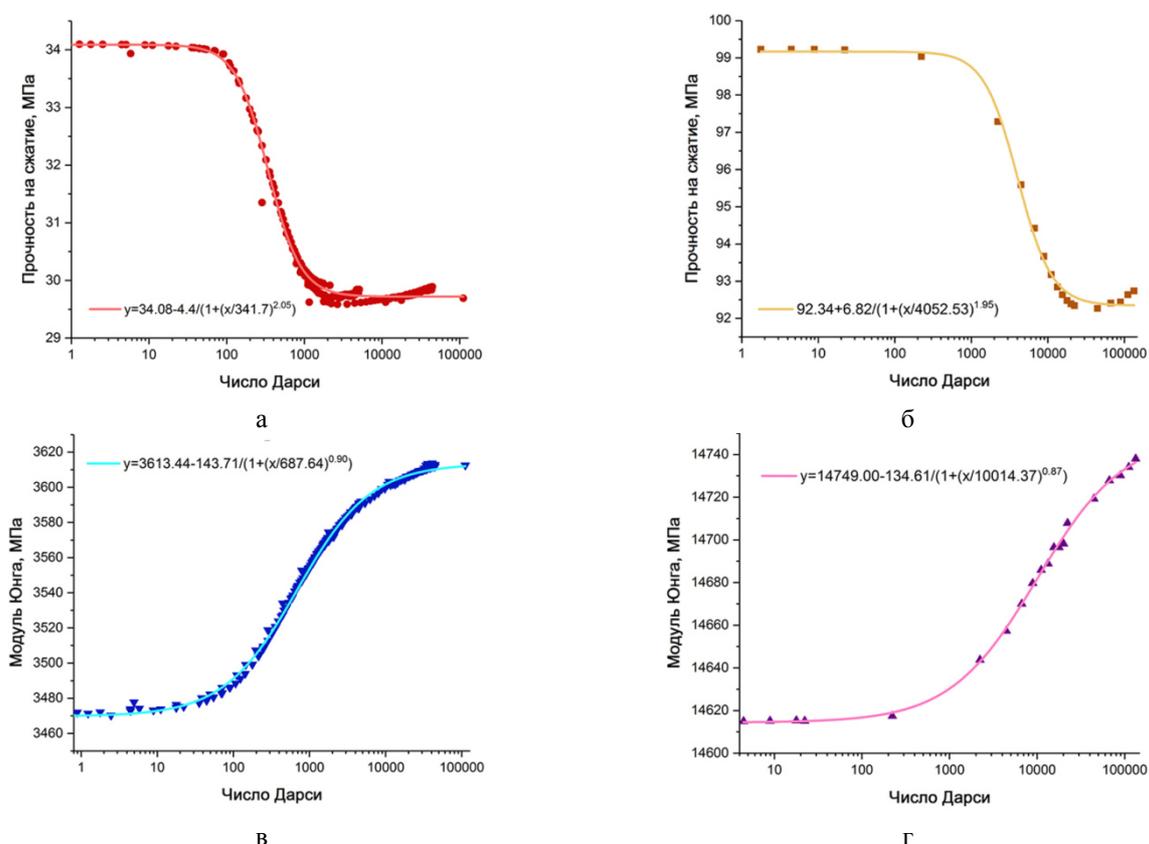


Рис. 2. Зависимости прочности на сжатие (а, б) и модуля Юнга (в, г) губчатой (а, в) и кортикальной (б, г) костных тканей, содержащих биологическую жидкость, от числа Дарси Da . Точки – результаты расчетов при различных значениях скорости деформации, сплошные линии – аппроксимирующие логистические функции. Различными цветами показаны серии расчетов при различных значениях проницаемости пористого каркаса костной ткани

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ в рамках научного проекта № 20-19-00743.

1. Ji X., Zhang H. Current Strategies for the Treatment of Early Stage Osteoarthritis // *Frontiers in Mechanical Engineering*. – 2019. – Vol. 5. – Article number 57.
2. Psakhie S.G., Dimaki A.V., Shilko E.V., Astafurov S.V. A coupled discrete element-finite difference approach for modeling mechanical response of fluid-saturated porous materials // *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. – 2016. – V. 106. – P. 623-643.