

Междисциплинарные вопросы математического моделирования регенерации костной ткани

Л.Б. Маслов,

д.ф.-м.н., заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики
Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина,
в.н.с. ИЦ «Центр компьютерного инжиниринга», ПИШ «Цифровой инжиниринг»
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

<https://www.researchgate.net/profile/Leonid-Maslov>

Сращение кости после перелома представляет собой сложный механобиологический процесс, в результате которого поврежденная кость должна полностью восстановить свою целостность и структуру. С развитием способов нежесткой фиксации и частичной поддержки веса большинство переломов заживляются непрямым или вторичным сращиванием. Непрямое сращивание начинается с образования гематомы, после чего один фенотип соединительной ткани сменяет другой. Известно, что данная последовательность дифференциации клеток чувствительна к локальному механическому полю внутри ткани.

В докладе обсуждается феноменологическая модель структурной перестройки костной ткани, основанная на критерии дифференциации клеток под управлением внешнего механического стимула периодического характера. Математические алгоритмы построены на численном решении уравнений колебаний сплошной среды, описываемой моделью пористого материала, насыщенного жидкостью. Процесс образования клеток и их миграция в процессе сращения перелома принимается случайным и ненаправленным, что описывается уравнением диффузии. Поскольку основная масса специфических костных клеток располагается на стенках канальцев и поверхностях лагун, входящих в систему микропор, то предполагается, что возмущения, вносимые внешней механической нагрузкой в установившееся движение жидкости в транспортной системе кости, могут обеспечивать передачу управляющих сигналов между клетками костной мозоли в процессе ее регенерации. В известных подходах используется управляющее правило для описания процесса перестройки недифференцированной ткани в плотную хрящевую или костную ткань в виде безразмерного «механорегулирующего индекса», определяющего фенотип ткани, образующейся в текущей точке среды в ответ на механическое воздействие.

Математическое моделирование дает возможность исследовать механизм восстановления поврежденных костных элементов опорно-двигательного аппарата человека при наличии динамической нагрузки и теоретически обосновать выбор оптимального периодического воздействия на поврежденные ткани с целью их скорейшего и устойчивого заживления. В частности, разработанные математические модели и компьютерные алгоритмы позволяют исследовать влияние частоты стимулирующей нагрузки на процесс перестройки ткани, влияние раннего нагружения на восстановление упругих свойств костной мозоли, влияние частоты и амплитуды стимулирующей нагрузки на процесс восстановления ткани в объеме пористого имплантата. Полученные численные результаты представляются достаточно реалистичными и соответствующими известным медицинским исследованиям процессов регенерации костной ткани в зоне перелома или имплантата.

Статьи по теме докладов

1. Митрофанов А.В., Маслов Л.Б., Мизонов В.Е. Вероятностная модель клеточных преобразований при регенерации костной ткани // Российский журнал биомеханики. – 2021. – Т. 25. – № 1. – С. 48–63.
2. Maslov L.B. Biomechanical model and numerical analysis of tissue regeneration within a porous scaffold

- // *Mechanics of Solids*. – 2020. – Vol. 55. – № 7. – P. 1115 – 1134.
3. Maslov L.B. Mathematical model of bone regeneration in a porous implant // *Mechanics of Composite Materials*. – 2017. – Vol. 53. – № 3. – pp. 399–414.
4. Кирпичев И.В., Коровин Д.И., Маслов Л.Б., Томин Н.Г. Математическая модель клеточных преобразований при регенерации костной ткани в условиях изменяющейся биохимической среды с возможной механорегуляцией // *Российский журнал биомеханики*. – 2016. – Т. 20. – № 3. – С. 220–235.
5. Маслов Л.Б., Коровин Д.И., Кирпичев И.В., Томин Н.Г. Применение математического моделирования для анализа регенерации костной ткани в условиях механорегуляции // *Хирургия тазобедренного сустава*. – 2016. – № 1. – С. 73–74.
6. Maslov L.B., Etheve J.-B., Sabaneev N.A. Finite-element study of vibration effect to fracture healing of a human tibia // *Vibroengineering PROCEDIA*. – 2016. – Vol. 8. – № 10. – P. 334-339.
7. Maslov L.B. Mathematical modeling of the callus mechanical properties restoration // *J. Appl. Math. Mech.* – 2015. – Vol. 79. – № 2. – P. 195-206.
8. Маслов Л.Б. Математическая модель структурной перестройки костной ткани // *Российский журнал биомеханики*. – 2013. – Т. 17. – № 2 (60). – С. 39–63.