

© Д.Афонин, П.Афонин, 2004.

Д.Н.Афонин, П.Н.Афонин

БИОМЕХАНИКА ПОЗВОНОЧНИКА ПРИ СПОНДИЛИТАХ

ГУ «СПбНИИ фтизиопульмонологии МЗ РФ»

Фирма "Medinform LTD"

Россия

Аннотация

Авторами на основе конечно-элементного анализа исследована биомеханика разрушения сегмента позвоночника при поражении его воспалительным процессом. Разработана методология клинического применения конечно-элементного моделирования у конкретных больных для исследования напряжений в позвоночнике и прогнозирования его разрушения при спондилитах.

Ключевые слова: Позвоночник; Спондилиты; Биомеханика; Конечно-элементное моделирование

Геополитические катаклизмы, сотрясающие нашу планету в последние десятилетия, лавинообразный рост числа больных туберкулезом, наркоманов, широкое внедрение в повседневную клиническую практику инвазивных методов исследования, эфферентной терапии, повышение агрессивности хирургических вмешательств и т.д. приводят к увеличению количества больных туберкулезом и остеомиелитом позвоночника [1].

Вопросы биомеханики позвоночника волнуют человечество с древнейших времен. Однако, несмотря на большое количество работ, посвященных биомеханике позвоночника как в норме, так и при различных воздействиях (вибрация, перегрузки, удары и т.п.), травмах и заболеваниях (остеопороз, остеохондроз, опухоли и др.), а так же последствий реконструктивно-восстановительных оперативных вмешательств [4 - 10], вопросы течения воспалительных заболеваний позвоночника с точки зрения биомеханики в современной отечественной и зарубежной литературе практически не рассматриваются. Современные средства визуализации позволяют констатировать изменения в отдельных позвонках, паравертебральных тканях и всем позвоночнике при спондилитах на различных стадиях заболевания и этапах лечения, однако, для прогнозирования течения заболевания и развития осложнений необходимы знания по биомеханике течения воспалительного процесса в позвоночнике [4, 10].

С целью исследования механических свойств позвонка при воспалительном процессе была построена модель тела позвонка (рисунок 1а). Модель состоит из сопряженных друг с другом корковой и спонгиозной (губчатой) частей тела позвонка. Форма и размеры модели тела позвонка выбраны на основе литературных данных [3, 5, 9]. С использованием построенной модели осуществлялось исследование напряжений в теле позвонка при разрушении вследствие воспалительного процесса спонгиозной

ткани и замыкательной пластинки.

Вычисления производились с использованием метода конечных элементов. В процессе вычислений, в соответствии с принятой расчетной схемой, строилась трехмерная геометрическая модель, производилось ее разбиение на конечные элементы, задавались граничные условия, производился расчет напряжений и перемещений.

Разрушение губчатой костной ткани вследствие развития в ней деструктивного воспалительного процесса (например, туберкулезной этиологии) моделировалось уменьшением её модуля Юнга с $E_r=0.76 \cdot 10^6$ Па до 0. При этом модуль Юнга компактной костной ткани считался постоянным и равным $E_r=1.61 \cdot 10^8$ Па.

Модель была разбита на 2176 конечных элементов (рисунок 1б). Нижняя поверхность тела позвонка считалась жестко закрепленной, по нормали к верхней поверхности тела позвонка была приложена сила 500Н.

Результаты исследования напряжений в теле позвоночника представлены на рисунках 1б и 1в).

Нетрудно заметить, что максимальные напряжения формируются в компактной костной ткани (рисунок 1б), несущей на себе основную нагрузку. Снижение модуля Юнга спонгиозной костной ткани длительное время практически не отражается на напряжениях, возникающих в компактной костной ткани. Однако, при значениях модуля Юнга спонгиозной ткани $E_r \sim 10^3$ Па, в компактной ткани возникают критические напряжения, которые, по данным литературы [9], приводят к ее разрушению. Клинически мы неоднократно наблюдали во время хирургических вмешательств (при туберкулезном спондилите) целое снаружи тело позвонка, издающее при постукивании по нему инструментом соответствующий «коробочный» звук, состоящее только из компактной костной ткани, содержащей внутри себя гной.

Распространение воспалительного процесса на замыкательную пластинку может происхо-

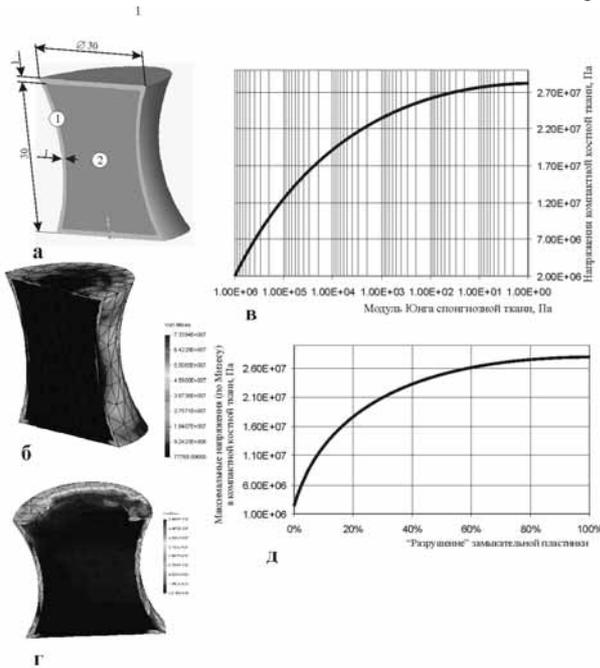


Рисунок 1. Исследование изменений механических свойств тела позвонка при развитии воспалительного процесса в спонгиозной ткани и разрушении замыкательной пластинки а - общий вид модели, 1 - компактная кость, 2 - спонгиозная костная ткань; б - распределение напряжений в (по Мизесу) в тканях позвонка при нагрузке; в - зависимость максимальных напряжений в позвонке от модуля Юнга спонгиозной ткани; г - распределение напряжений в теле позвонка с частично (44.4% площади) разрушенной краниальной замыкательной пластинкой; в - зависимость максимальных напряжений в компактной костной ткани тела позвонка от "разрушения" (в % по отношению к площади) замыкательной пластинки.

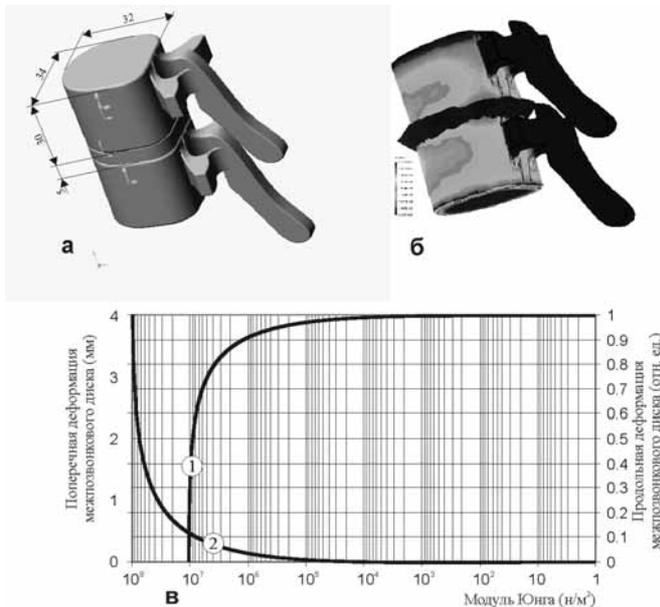


Рисунок 2. Конечнo-элементное моделирование деформации межпозвоночного диска при спондилитах. а - общий вид модели, б - модель деформации позвоночно-двигательного сегмента при воспалительном поражении межпозвоночного диска (наглядно видно, как фрагменты разрушенного диска выступают в просвет позвоночного канала), в - графики зависимости поперечной (1) и продольной (2) деформации межпозвоночного диска от модуля Юнга.

дить как со стороны диска (например, при гематогенном остеомиелите), так и со стороны губчатой костной ткани тела позвонка (при туберкулезном спондилите) [1]. В любом случае её разрушение значительно снижает прочность всей конструкции. В нашей модели механические свойства тела позвонка при разрушении краниальной замыкательной пластинки мы исследовали путем формирования в ней отверстия и постепенным его увеличением до 15 мм (радиус «тела позвонка» 15 мм) – рисунок 1г. Модули Юнга костной ткани оставались постоянными ($E_r=0.76 \cdot 10^6 \text{ Па}$, $E_k=1.61 \cdot 10^8 \text{ Па}$). Проведенное исследование показало (рисунки 1г и 1д), что по мере увеличения радиуса отверстия в замыкательной пластинке, возрастают напряжения в ее оставшейся части и «боковых» частях компактной костной ткани, достигая критических значений.

Кроме того, происходит перераспределение напряжений в спонгиозной ткани тела позвонка. Однако, даже при полном «разрушении» замыкательной пластинки напряжения в спонгиозной костной ткани тела позвонка не достигают критических значений.

С целью исследования деформации позвоночного канала на уровне воспалительного процесса в позвоночнике была построена модель позвоночно-двигательного сегмента, состоящая из двух позвонков и межпозвоночного диска.

Геометрические размеры элементов моделируемого сегмента представлены на рисунке 2а. Исходные биомеханические характеристики костной ткани были использованы те же, что и в предыдущих моделях. Воспалительный процесс в межпозвоночном диске приводит к ухудшению его механических свойств и разрушению [6, 7]. При моделировании этого процесса межпозвоночный диск мы рассматривали как изотропную пластинку. Развитие воспалительного процесса моделировалось постепенным уменьшением модуля Юнга материала межпозвоночного диска в продольном направлении от 10^8 Па до 0, в поперечном направлении от 10^7 Па до 0.

Для каудальной поверхности нижнего позвонка были запрещены все перемещения и углы поворота. По нормали к краниальной поверхности верхнего позвонка была приложена сила 500 Н, имитирующая физиологическую вертикальную нагрузку на исследуемый позвоночно-двигательный сегмент.

Зависимость вертикальной деформации межпозвоночного диска от его модуля Юнга представлена на рисунке 2в (2) и объяс-

няет причину снижения высоты межпозвонкового диска по мере развития в нем воспалительного процесса. По мере деформации и разрушения межпозвонкового диска наблюдается «выдавливание» его фрагментов в просвет позвоночного канала (под заднюю продольную связку). Зависимость горизонтальной деформации межпозвонкового диска по оси X в просвет позвоночного канала в исследуемой модели представлена на рисунке 2в (1). Наглядно процесс «выдавливания» фрагментов межпозвонкового диска в просвет позвоночного канала при снижении его механических свойств представлен на трехмерной реконструкции модели (рисунк 2б).

Клиническое значение полученных данных заключается в биомеханическом объяснении одной из причин сужения позвоночного канала и компрессии спинного мозга при воспалительных заболеваниях позвоночника.

В заключение представим результаты исследования деформации позвоночника у больного М., 24 лет, страдающего туберкулезным спондилитом Th₇₋₉ позвонков, спондилитическая фаза, период разгара (рисунки 3а и 3б). Алгоритм построения модели представлен на рисунке 3в. При построении твердотельной модели исследуемого сегмента позвоночника больного М. были использованы те же идеализированные элементы, что и в последней модели. При этом размеры их брались на основании данных рентгенометрии.

Модель (рисунок 3г) состоит из трех позвонков Th₇₋₉. При этом от тела Th₈ позвонка остался только клиновидный фрагмент. Как и в предыдущих моделях, для нижней площадки тела Th₉ позвонка были запрещены все перемещения, к верхней площадке Th₇ позвонка приложена вертикальная сила 250 Н (известно, что нагрузка на Th₇ позвонок составляет 33-38% веса тела [2, 5]). Модель состоит из 9982 элементов.

Распределение напряжений в исследуемой модели представлено на рисунке 3д и наглядно свидетельствует о концентрации в передних отделах тел позвонков напряжений, близких к предельно допустимым, что при отсутствии лечения будет способствовать прогрессированию разрушения позвоночника и дальнейшей его деформации (больному 28.01.02 г. выполнена реконструктивно-восстановительная операция. Результат лечения – хороший, больной поднят на ноги и выписан на амбулаторное лечение через 1 месяц после операции).

Представленное наблюдение показывает возможность практического применения конечно-элементного моделирования пораженного сег-

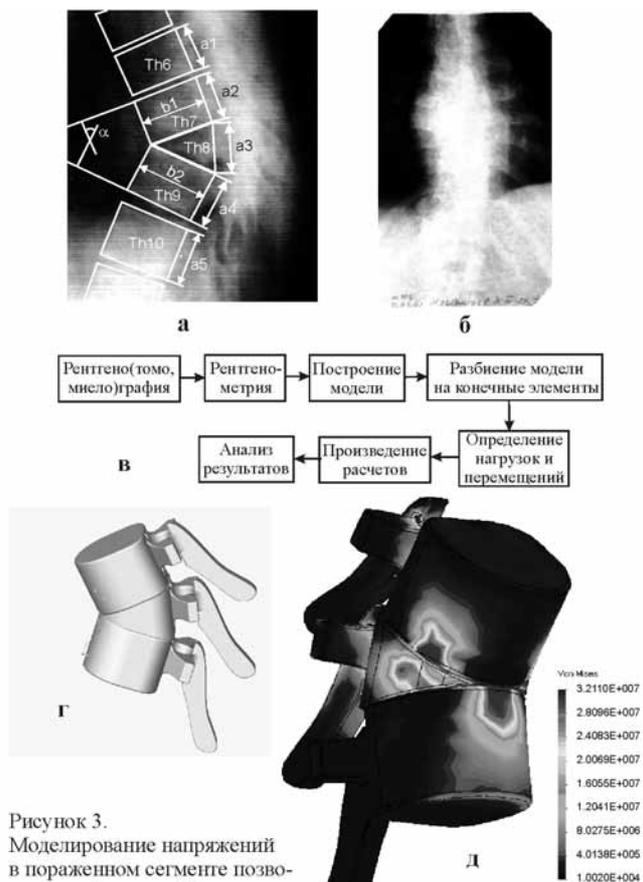


Рисунок 3. Моделирование напряжений в пораженном сегменте позвоночника больного М. а, б - рентгенограммы больного; в - алгоритм проводимого исследования; г - общий вид построенной модели; д - результаты моделирования: распределение напряжений в пораженном сегменте позвоночника у больного М.

мента позвоночника, основанного на рентгенометрических данных, при спондилитах в исследовании биомеханики позвоночника и прогнозирования течения патологического процесса в клинической практике у конкретных больных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Внелегочный туберкулез. Руководство для врачей. Под ред. А.В.Васильева. – СПб.: ИКФ "Фолиант", 2000. – 562 с.
2. Советова Н.А., Мальченко О.В., Мушкин А.Ю. и др. Лучевая диагностика костно-суставного туберкулеза и пограничных заболеваний скелета // Пробл. туб. - 1998. - № 5. - С. 28-31.
3. Berry J.L. A morphometric study of human lumbar and selected thoracic vertebrae // Spine.- 1987.- V. 12, N. 4.- P. 362-367.
4. Gilbertson L.G., Goel V.K., Kong W.Z., Clausen J.D. Finite element methods in spine biomechanics research // Crit. Rev. Biomed. Eng.- 1995.- V. 23, N 5-6. P. 411-473.
5. Goel V.K., Gilbertson L.G. Applications of the finite method to thoracolumbar spinal research: Past, present, and future // Spine.- 1995.- V.20, N. 8.- P. 1719-1727.
6. Klisch S. M., Lotz J.C. Application of a fiber-

**First International Scientific Distance Congress on Spine and Spinal Cord Surgery
"InterSpine - 2004" , Saint-Petersburg, Russia, September, 2004**

- 11 -

reinforced continuum theory to multiple deformations of the annulus fibrosus // J. Biomech.- 1999.- V. 32, N. 11.- P. 1027-1036.

7. Meakin J.R., Hukins D.W.L. Effect of removing the nucleus pulposus on the deformation of the annulus fibrosus during compression of the intervertebral disc // J. Biomech.- 2000.- V. 33, N. 6.- P. 575-580.

8. Rostedt M., Ekstroffin L., Broman H., Hansson T. Axial stiffness of human lumbar motion segments, force

dependence // J. Biomech.- 1998.- V. 31, N. 6.- P. 503–509.

9. Suwito W., Keller T.S., Basu P.K. et al Geometric and material property study of the human lumbar spine using the finite element method // J. Spinal Disord.- 1992.- V.5, N 4.- P. 50-59.

10. Whyne C.M., Hu S.S., Lotz J.C. Parametric finite element analysis of vertebral bodies affected by tumors // J. Biomech.- 2001.- V. 34, N. 12.- P. 1317–1324.

D.N.Afonin, P.N.Afonin

SPINAL BIOMECHANICS IN SPONDYLITES

*St.Petersburg Research Institute of Tuberculosis
St.Petersburg, Russia*

Authors on the basis of the finite-elements analysis investigate a bodily machinery of destruction of a segment of the spine at defeat by its inflammatory process. The methodology of clinical application of the finite-elements modelling at concrete patients for research of strains in the spine and forecasting of its destruction is developed at spondylites.

Авторы: Афонин Дмитрий Николаевич - доктор мед. наук, ГУ «СПбНИИ фтизиопульмонологии МЗ РФ»

Афонин Петр Николаевич - доктор техн. наук, СПб филиал РТА

E mail: medinform@yandex.ru