

УДК 004:616.711

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ  
В КЛИНИЧЕСКОЙ БИОМЕХАНИКЕ ПОЗВОНОЧНИКА**

*Руженцов Е. А.*

**Научный руководитель: к.м.н. Е. Л. Цитко**

**Учреждение образования  
«Гомельский государственный медицинский университет»  
г. Гомель, Республика Беларусь**

***Введение***

Позвоночник представляет собой сложную трехмерную конструкцию, анатомические особенности которой обеспечивают движения как изолированно в любой из трех плоскостей, так и одновременно в нескольких. Наиболее функционально активным является поясничный отдел (ПО) [1]. Традиционно, при выборе тактики лечения, врачи стараются определить морфологические изменения в позвоночнике, которые ответственны за клинику заболевания. Однако существующие методы диагностики зачастую не позволяют выявить морфологический субстрат болевого синдрома [1, 2].

***Цель***

Разработать математическую модель и определить возможности компьютерного моделирования в клинической биомеханике ПО позвоночника.

***Материал и методы исследования***

Для построения модели ПО использовалось оригинальное программное средство, которое выполняет измерение основных геометрических параметров тел, отростков позвонков, межпозвонковых дисков (МПД) по рентгеновским изображениям в формате DICOM и строит персонифицированную 3D модель ПО на участке от L1 до L5 позвонков. На основе которой автоматически генерируется конечно-элементная математическая модель [2].

***Результаты исследования и их обсуждение***

Получаемые посредством программ просмотрщиков медицинского изображения формата DICOM 3D модели являются растровыми и не могут использоваться в дальнейшем математическом анализе. Это существенно ограничивает возможности практического применения данных виртуальных моделей в основном морфометрией [3, 4].

Преобразование вышеуказанных моделей в твердотельную 3D модель, состоящую из геометрических примитивов, позволяет оценить распределение нагрузок в изучаемой системе, посредством конечно-элементного анализа. Метод конечных элементов (МКЭ) реализует алгоритм исследования поведения системы на основе законов поведения отдельных ее частей [4]. Изучая литературные данные, выявлен существенный разброс показателей механических свойств (модуль Юнга, коэффициент Пуассона) костной ткани, связок и межпозвоночного диска, что свидетельствует об отсутствии стандартизации их по возрасту и полу. Учитывая еще и анизотропию свойств структурных элементов ПО, для воспроизводимости и унификации анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) посредством МКЭ, при расчетах необходимо соблюдать ряд условий и предположений. Необходимо четко определить зоны закрепления модели и приложения нагрузки, задать реологические свойства конечных элементов [1, 3, 4, 5].

При исследовании НДС в сгенерированных программным средством конечно-элементных моделях предполагалось, что позвонки представляют собой линейно-упругое тело, а межпозвонковые диски — упругопластическое тело. Границы между позвонками и межпозвонковыми дисками считались строго общими, между элементами отсутствовали пустоты. Модели имеют жесткое закрепление по нижней плоскости тела

позвонка L5, нагрузки распределялись по верхней поверхности позвонка L1 таким образом, что 400 Н прикладывалось на переднюю половину тела, а 600 Н на заднюю и дугоотростчатые суставы. При этом на каждой части поверхности позвонка нагрузка распределялась равномерно. К позвонкам прикладывались квазистатические нагрузки. При моделировании использовались физико-механические свойства биологических тканей (таблица 1). По умолчанию материал считался однородным и изотропным.

Таблица 1 — Физические характеристики материалов при моделировании

Материал	Модуль упругости Юнга, Па	Коэффициент Пуассона	Плотность, кг/м <sup>3</sup>
Кость	350000000	0,3	2020
Межпозвонокковый диск	57000000	0,4	1090,3

Соблюдая вышеуказанные условия создается математическая модель распределения напряжений в ПО под действием осевой сжимающей нагрузки (рисунок 1).

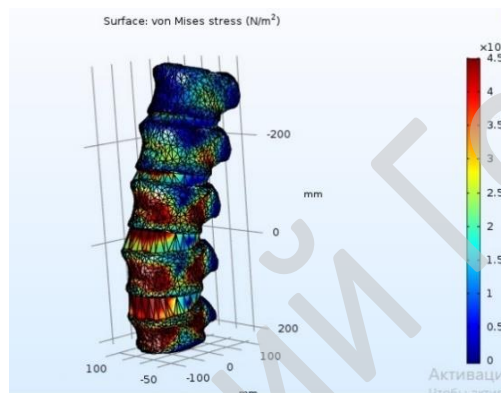


Рисунок 1 — Напряжения по Мизесу поясничного отдела позвоночника в вертикальном положении, Н/м<sup>2</sup>

Результаты расчета НДС ПОП в вертикальном положении показывают, что наибольшим напряжениям подвергаются передне-верхние и задне-базальные отделы фиброзного кольца МПД L2–L3, L3–L4 и L4–L5 в диапазоне  $4,0–4,5 \times 10^3$  Н/м<sup>2</sup>, а также антральные и дорзальные отделы тел L3, L4, L5 в диапазоне  $3,5–4,0 \times 10^3$  Н/м<sup>2</sup>. Максимальная площадь зон сжатия приходится на уровне тела L4 и вентральные отделы МПД L4–L5.

Валидация получаемых моделей, в связи с определенными трудностями, зачастую не выполнима. Поэтому разработка адекватных математических моделей с максимально реалистичной геометрией крайне актуальна, для получения достоверного результата.

### Выводы

Изучение напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов является достоверным способом изучения биомеханики позвоночника. Разработанная математическая модель и предложенная методика задания ее параметров позволяет повысить значимость расчетов. Учитывая отсутствие методик валидации расчетов, оптимально использовать их для сравнительных исследований. Актуально изучение биофизических свойств костной и соединительной ткани с целью определения реалистичных граничных условий.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Чуйко, А. Н. Приближенный анализ анатомии, механических характеристик и напряженно-деформированного состояния позвоночника человека / А. Н. Чуйко // Травма. — 2014. — № 6. — С. 100–109.
2. Рентгенометрическая оценка кинематики пояснично-крестцового отдела позвоночника при остеохондрозе с помощью программного средства «ВОЛОТ» / Е. Л. Цитко [и др.] // Проблемы здоровья и экологии. — 2017. — № 4. — С. 35–41.

3. Кизилова, Н. Н. Метод конечных элементов в современной биомеханике / Н. Н. Кизилова // Современные проблемы естественных наук. — 2014. — Т. 1(2). — С. 18–34.
4. Абульханов, С. Р. Построение сечений твердотельных моделей поясничного позвонка по произвольным поверхностям / С. Р. Абульханов, М. Д. Карлова, И. П. Сорокин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. — 2012. — № 6. — С. 38–42.
5. Validation and application of an intervertebral disc finite element model utilizing independently constructed tissue-level constitutive formulations that are nonlinear, anisotropic, and time-dependent / N. T. Jacobs [et al.] // Journal of Biomechanics. — 2014. — Vol. 47. — P. 2540–2546.

**УДК 616.8-004-07: 004.42**

**ВОЗМОЖНОСТИ 3D-МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ОЦЕНКЕ ОЧАГОВ  
ДЕМИЕЛИНИЗАЦИИ У ПАЦИЕНТОВ С РАССЕЯННЫМ СКЛЕРОЗОМ**

*Рушкевич И. В.*

**Научные руководители: ассистент М. А. Андреева,  
заведующий лабораторией Г. М. Каранетян**

**Учреждение образования  
«Белорусский государственный медицинский университет»  
г. Минск, Республика Беларусь**

***Введение***

Рассеянный склероз (РС) — самое распространенное демиелинизирующее заболевание, поражающее людей молодого и трудоспособного возраста. Заболевание является не только медицинской, но и социальной, государственной проблемой, что обуславливает высокую актуальность исследований в данной области. Ключевое диагностическое значение для оценки состояния и динамики пациентов с РС имеет нейровизуализационная характеристика очагов на основании результатов магнитно-резонансной томографии (МРТ). Использование 3D-моделирования помогает более точному и эффективному анализу МРТ-сканов.

***Цель***

Сравнить результаты сегментации очагов демиелинизации, полученные с помощью методов ручного оконтуривания и полуавтоматического выделения очагов на аксиальных срезах у пациентов с РС; определить время, затраченное на сегментацию очагов вышеназванными методами; сравнить диагностическую значимость 3D-моделей, построенных на основании аксиальной плоскости и трехплоскостных 3D-моделей, построенных на основании аксиальной, сагиттальной и коронарной плоскостей.

***Материалы и методы исследования***

Проведен анализ 25 МРТ-серий в формате DICOM пациентов с РС, полученных на аппарате с напряженностью магнитного поля 1,5Тл (Philips). Анализировались T2W, FLAIR последовательности, выполненные в аксиальной, сагиттальной и фронтальной плоскостях. В ходе данной научной работы была использована программа «Brain Snitch», разработанная лабораторией информационных технологий БГМУ совместно с кафедрой нервных и нейрохирургических болезней. В основу программы заложена автоматизированная программная трехмерная реконструкция очагов демиелинизации в объемном представлении и произвольной пространственной ориентации с использованием алгоритмов сегментации слабоконтрастных изображений. Идентичные сканы обрабатывались двумя различными способами: ручного оконтуривания (края выделяемого объекта составлялись прямыми линиями, которые строятся между расставленными пользователем точками) и полуавтоматического выделения с помощью инструмента «SmartBrush» (инструмент распознает границы очага на основании разницы математи-