

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОЯСНИЧНОГО ОТДЕЛА ПОЗВОНОЧНИКА ЧЕЛОВЕКА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА КТ-ИЗОБРАЖЕНИЙ

Семенченя Т. С., Курочка К. С.
Кафедра информационных технологий,
Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого
Гомель, Республика Беларусь
E-mail: levts@gstu.by

В данной работе предлагается исследование напряженно-деформированного состояния моделей поясничного отдела позвоночника человека с различными нагрузками. Построенные, на основе анализа изображений компьютерной томографии, модели могут быть использованы для анализа состояния сегмента позвоночника в норме, при нестандартных нагрузках и патологических изменениях.

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 активным является поясничный отдел позвоночника человека. При выборе тактики лечения, врачи стараются определить морфологические изменения в позвоночнике, которые ответственны за клинику заболевания [1, 2].

В последнее время с целью усовершенствования методик лечения и хирургических вмешательств применяется математическое моделирование. Модель дает значительно больше информации о биомеханике позвоночника, чем можно получить современными средствами измерений. При анализе поведения модели поясничного отдела позвоночника человека варьирование значений параметров структур позвоночного столба дает возможность определить влияние каждого из них на проявление синдрома и возможные последствия хирургических вмешательств.

Одним из наиболее информативных методов изучения напряженно-деформированного состояния является метод конечных элементов. К плюсам данного метода можно отнести: возможность моделирования тел с различными материалами, хорошая аппроксимация криволинейных границ, возможность уточнения результатов путем измельчения сетки конечных элементов, учет различных граничных условий.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для исследования моделей было разработано программное средство, которое строит 3D-модель содержащую позвонки и межпозвонковые диски, на основе анализа КТ-изображений [3]. Полученная модель представлена на рисунке (см. рис. 1).

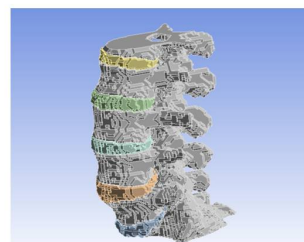


Рис. 1 – Математическая модель поясничного отдела позвоночника человека

Для сравнения НДС провели исследования на двух моделях поясничного отдела позвоночника человека – с межпозвонковыми дисками и с отсутствием одного межпозвонкового диска.

Для исследования использовали специализированный программный продукт ANSYS.

При исследовании НДС в сгенерированных программным средством конечноэлементных моделях предполагалось, что позвонки представляют собой линейноупругое тело, а межпозвонковые диски – упругопластическое тело.

Для проведения расчета НДС необходимо определить параметры материалов, из которых состоят позвонки и межпозвонковые диски. Материалы, используемые при построении модели, считаются однородными и изотропными. Модуль упругости и коэффициент Пуассона приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Физические характеристики материалов, используемые при построении конечно-элементной модели поясничного отдела позвоночника человека

Материал	Модуль упругости Юнга, МПа	Коэффициент Пуассона
Кость	100	0.2
Межпозвонковый диск	5	0.49

Для проведения анализа нужно на основе трехмерной модели создать конечно-элементную сетку, так как программный комплекс использует конечные элементы для проведения расчетов. Сетка создается внутри программы, то есть не

требует никакого дополнительного программного обеспечения.

После создания сетки требуется указать ограничения, в данном случае необходимо только два: масса, которая имитирует давление на позвоночник человека в вертикальном положении сверху; закрепление, которое необходимо для того, чтобы математическая модель была корректной и при усилии на которую она не двигалась. В данном случае необходимо закрепить нижнюю поверхность позвоночника в районе крестца.

При учете этих ограничений математическая модель будет имитировать настоящий позвоночник в упрощенном виде.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЯ

Для проведения экспериментов использовалась серия КТ-изображений поясничного отдела позвоночника человека с различными нагрузками и моделями (с межпозвонковыми дисками и без них).

В процессе проведения напряженно-деформированного анализа получены значения напряжений, которые указаны в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты напряженно-деформированного анализа поясничного отдела позвоночника человека

Нагрузка(кг)	Среднее напряжение модели без межпозвонкового диска (МПа) в Ansys	Среднее напряжение модели с межпозвонковыми дисками (МПа) в Ansys
40	3.95	0.88
65	6.42	1.44
85	8.4	1.88
120	11.85	2.66
150	14.81	3.33

По результатам расчета напряженно-деформированного анализа поясничного отдела позвоночника человека можно заметить, что зависимость напряжения прямо пропорциональна прикладываемой нагрузке. При этом в модели поясничного отдела позвоночника человека без межпозвонковых дисков среднее напряжение в несколько раз превышает значения модели с межпозвонковыми дисками, на основании чего можно сделать вывод, что трехмерная модель является корректной, а результаты расчеты приближены к реальному поведению настоящего позвоночника.

На рисунке показано исследование НДС поясничного отдела позвоночника человека с межпозвонковыми дисками (см. рис. 2). Анализ результатов показал, что наиболее напряженными участками являются области ножек дуги позвонков.

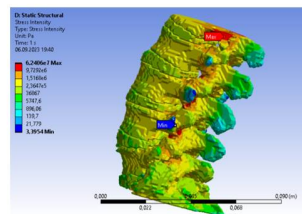


Рис. 2 – Распределение напряжения в модели поясничного отдела позвоночника с межпозвонковыми дисками

На рисунке показана трехмерная модель с распределением напряжения в случае отсутствия одного межпозвонкового диска (см. рис. 3).

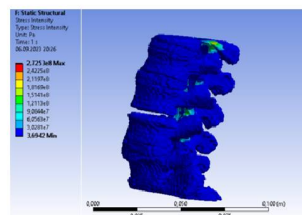


Рис. 3 – Распределение напряжения в модели поясничного отдела позвоночника с отсутствием одного межпозвонкового диска

На модели с напряжением можно увидеть области локализации повышенного напряжения. Одно из таких мест – место, где нет межпозвонкового диска. При необходимости замены удаленного межпозвонкового диска на протез, можно перед операцией провести анализ, в котором можно выяснить, как отразятся изменения на позвоночнике и на что нужно обратить внимание.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная математическая модель и предложенная методика задания ее параметров позволяет повысить значимость расчетов. Конечно-элементную модель поясничного отдела позвоночника человека можно использовать для исследования напряженно-деформированного состояния при имитировании разнообразных патологий под действием вертикальной нагрузки, а также при моделировании различных хирургических вмешательств, тестировании и оптимизации дизайна искусственных позвонков и устройств для фиксации костей.

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. Цитко, Е. Л. Рентгенометрическая оценка кинематики пояснично-крестцового отдела позвоночника при остеохондрозе с помощью программного средства «ВО-ЛОТ» / Е. Л. Цитко // Проблемы здоровья и экологии. – 2017. – №4. – С. 35–41.
3. Курочка, К. С. Construction of an individual geometric 3D model of the lumbar spine of a person based on the analysis of medical images / К. С. Курочка, Т. С. Семенченя // Сборник научных трудов «Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем», 19 – 22 февраля 2020 г. – Минск: БГУИР, 2020. – с. 291–297.