

Министерство образования и науки Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра математической теории
упругости и биомеханики

**Оценка напряженно-деформированного состояния позвоночно-
двигательного сегмента**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студентки 4 курса 431 группы

направления 01.03.03 Механика и математическое моделирование

механико- математического факультета

Курбатовой Марии Андреевны

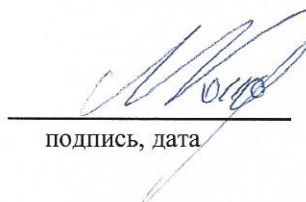
Научный руководитель
доцент, к.ф.-м.н.



подпись, дата

А.А.Голядкина

Зав. кафедрой
д.ф.-м.н., профессор



подпись, дата

Л.Ю. Коссович

Саратов 2017

Введение

Позвоночник является главной опорной структурой тела. Без позвоночника человек не мог бы ходить и даже стоять. Иным ценным назначением позвоночника является защита спинного мозга. Большая частота заболеваний позвоночника у современного человека обусловлена по большей части его прямохождением. Для того чтобы понимать причины и механизмы заболеваний позвоночника, требуется изучить основы анатомии и физиологии позвоночного столба и спинного мозга [1].

Актуальность травмы позвоночника составляют до 17% травм опорно-двигательного аппарата. Наряду с этим на долю травм поясничного отдела выпадает от 15 до 40 случаев на миллион населения. Объектом исследования данной бакалаврской работы является одно из распространенных проявлений дегенеративных поражений позвоночника – спондилолистез.

По словам вертебрологов, дегенеративные заболевания позвонков и межпозвонковых дисков в определенной степени наблюдаются у большинства взрослых людей не зависимо от пола и возраста. В то же время очень важно оценить влияние патологии и её степень на позвоночник в целом[2].

В последние годы для проведения экспериментальных исследований на поясничном отделе позвоночника широко применяют математическое моделирование конечно элементным методом [3–7]. Посредством данного метода изучают качественные и количественные характеристики напряженно-деформированного состояния (НДС) при моделировании различных патологических состояний и ятрогенных повреждений в них.

Метод конечных элементов (МКЭ) – это численный метод решения дифференциальных уравнений с частными производными, и интегральных уравнений, которые возникают при решении задач прикладной физики [8].

Общая характеристика работы. Выпускная квалификационная работа выполнена на тему «Оценка напряженно-деформированного состояния позвоночно-двигательного сегмента». В работе проведено биомеханическое моделирование позвоночно-двигательного сегмента L3–L4 в пределах нормы

и при 4 стадиях спондилолистеза. Проведены расчеты на прочность моделей с приложенной нагрузкой в 200 Н к верхней замыкательной пластине позвонка L3. Выполнен анализ напряженно-деформированного состояния позвоночно-двигательного сегмента (ПДС).

Объектом исследования является позвоночно-двигательный сегмент L3-L4 в пределах нормы и при 4 стадиях спондилолистеза.

Целью данной бакалаврской работы является:

- Оценка напряженно-деформированного состояния позвоночно-двигательного сегмента при наличии спондилолистеза.

Для достижения цели данной работы были поставлены и решены следующие задачи:

- Изучение нормальной и патологической анатомии и физиологии позвоночно – двигательного сегмента.
- Трехмерное моделирование сегмента позвоночника L3 – L4.
- Численный эксперимент.
- Анализ напряженно-деформированного состояния позвоночно–двигательного сегмента при 4 степенях спондилолистеза.

Структура и объем работы. Выпускная квалификационная работа состоит из обозначений и сокращений, введения, 4 глав, заключения, списка использованных источников, включающего в себя 34 наименования. Работа изложена на 37 листах, содержит 36 рисунков и 3 таблицы.

Основное содержание работы

Во введении обосновывается важность дегенеративного поражения позвоночника, математическое моделирование в современной травматологии.

В первой главе рассмотрена нормальная анатомия позвоночно-двигательного сегмента поясничного отдела. Описан вид клинической классификации заболевания спондилолистез (рис. 1).

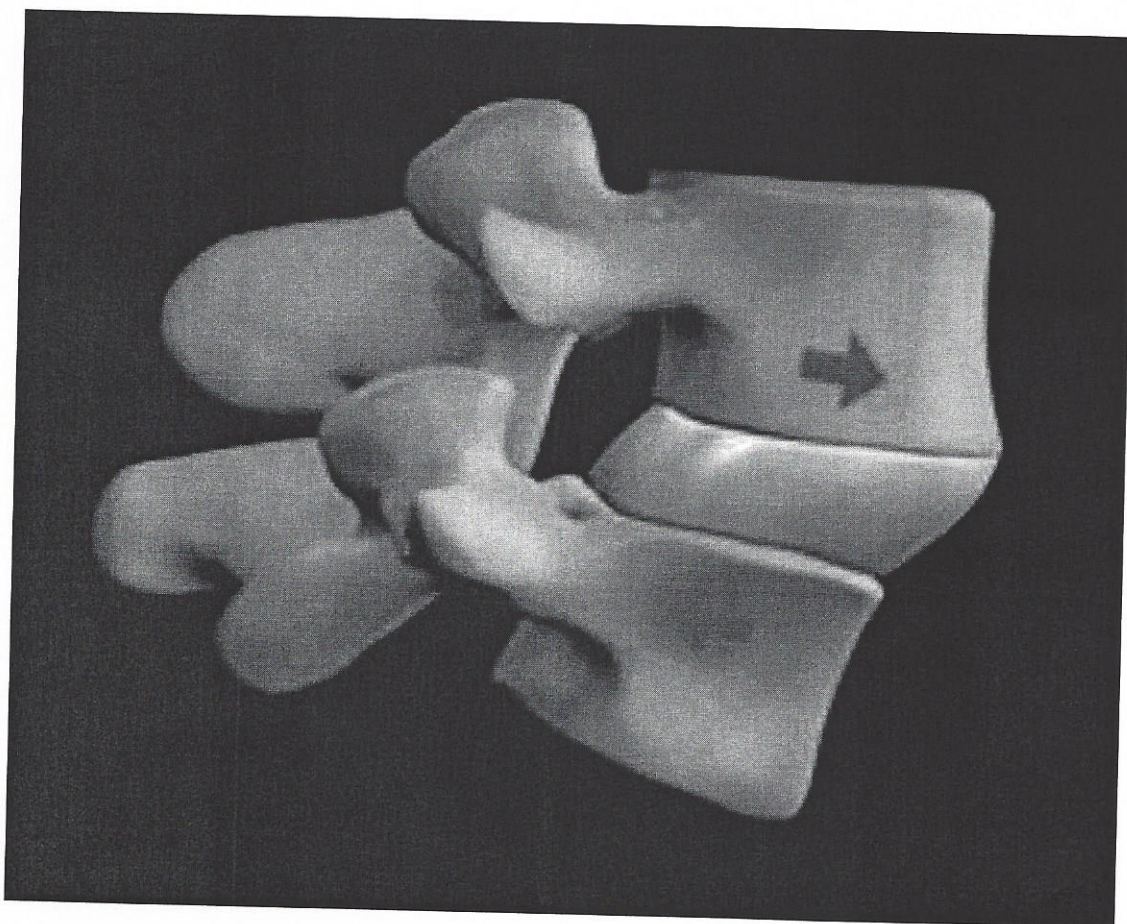


Рисунок 1– Спондилолистез [9].

Во второй главе проводится создание геометрии позвоночно-двигательного сегмента в пределах нормы (рис. 2) и с заболеванием спондилолистез в 4 стадиях (рис. 3-6).

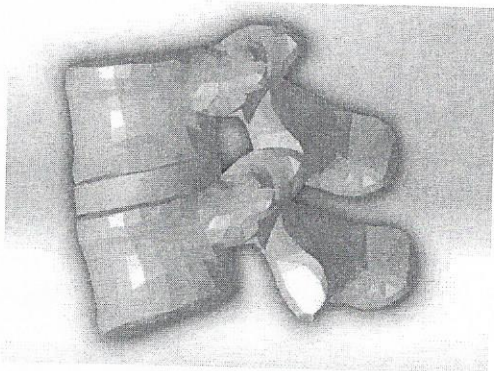


Рисунок 2– 3D модель ПДС в пределах нормы.

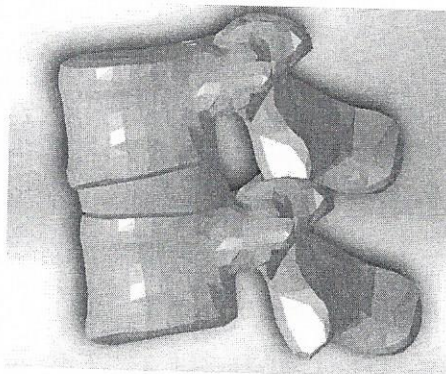


Рисунок 3– 3D модель ПДС с I стадией спондилолистеза.

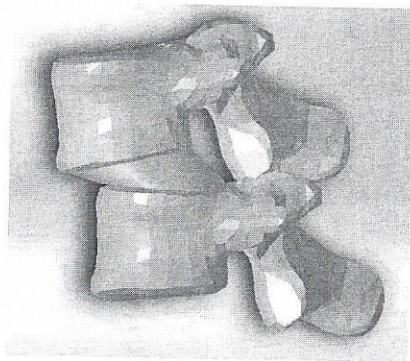


Рисунок 4— 3D модель ПДС со II стадией спондилолистеза.

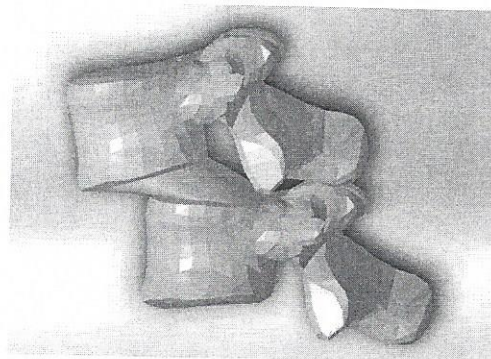


Рисунок 5— 3D модель ПДС с III стадией спондилолистеза.

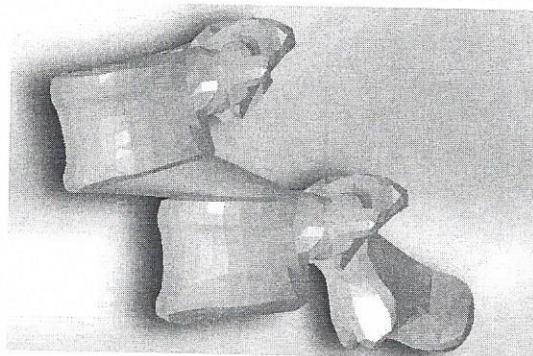


Рисунок 6— 3D модель ПДС с IV стадией спондилолистеза.

В третьей главе описана математическая постановка задачи. Данная задача является статической задачей теории упругости. Ее можно представить в виде основной задачи третьего типа, в которой требуется определить компоненты тензора напряжений $\sigma_{ij}(x_k)$ и перемещения $u_i(x_k)$, удовлетворяющим основным уравнениям:

$$\sigma_{ij,j} = 0, \quad (1)$$

где σ_{ij} — компоненты тензора напряжений.

$$\sigma_{ij} = \lambda \theta \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij}, \quad (2)$$

где λ — коэффициент Ламе,

θ_i — объемная деформация,

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}), \quad (3)$$

где ε_{ij} тензор поля деформации $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}(x_k)$,

u_i — вектор перемещений $u_{ij} = u_{ij}(x_k)$, связывающие компоненты тензора деформации и перемещения при выполнении смешанных граничных условий:

$$\begin{cases} \sigma_{ij} n_j |_{s_t=t_i} \\ u_i |_{s_u} = u_i^{(s)} \end{cases} \quad (4)$$

Для расчетов на прочность построенных моделей была выбрана универсальная программная система конечно-элементного анализа ANSYS Workbench, в которую были импортированы модели.

Проект в программной среде Ansys Workbench представляется в виде взаимосвязанных систем в форме блок-схемы. Необходимые для расчета свойства материалов задаются в разделе Engineering Data. Свойства используемых материалов указаны в таблице 1.

Таблица 1–Свойства материалов[10].

Тип материала	Модуль Юнга (Па)	Коэффициент Пуассона
Тело позвонка	$2 \cdot 10^{12}$	0.35
Межпозвонковый диск	$1 \cdot 10^7$	0.499

В четвертой главе для данных конструкций был проведен анализ распределения значений перемещений и эквивалентных напряжений (ЭН), возникающих в позвонках L3-L4 и межпозвонковом диске.

Выявлено, что в модели ПДС в пределах нормы максимальные значения перемещений концентрируются в передней части позвонка L3, в межпозвонковом диске и на верхних суставных отростках позвонка L4 (рис. 7). При оценке эквивалентных напряжений в модели ПДС в пределах нормы максимальные значения наблюдаются в нижних суставных отростках позвонка L3, и в межпозвонковом диске (рис. 8).

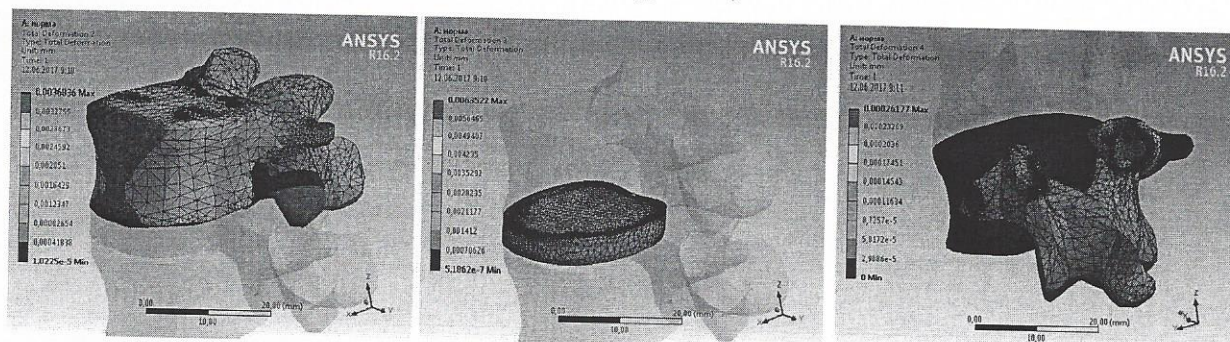


Рисунок 7– Перемещения в пределах нормы в а) позвонке L3 б) межпозвонковом диске в) позвонке L4.

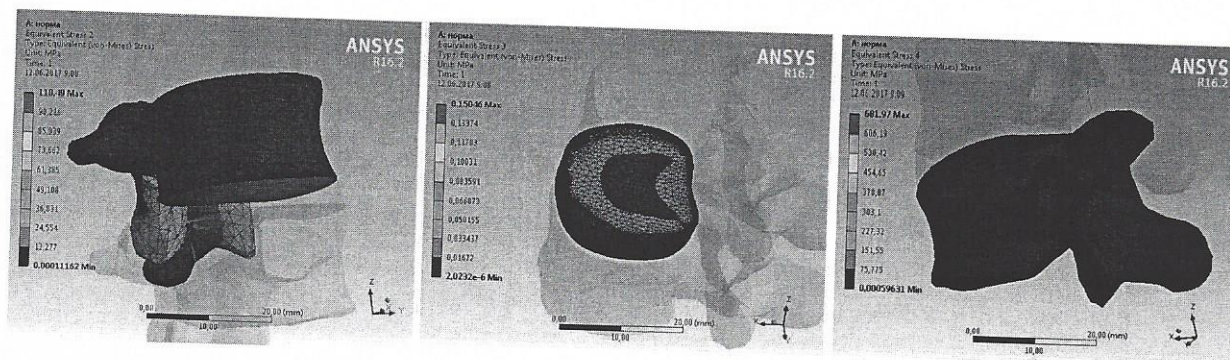


Рисунок 8 – Эквивалентные напряжения в пределах нормы в а) позвонке L3 б) межпозвонковом диске в) позвонке L4.

В модели ПДС при наличии I стадии спондилолистеза максимальные значения перемещений смещаются к краю верхней грани замыкательной пластины позвонка L3 (рис. 9). Наибольшие значения эквивалентных напряжений достигаются в межпозвонковом диске и в верхних суставных отростках позвонка L3 (рис. 10).

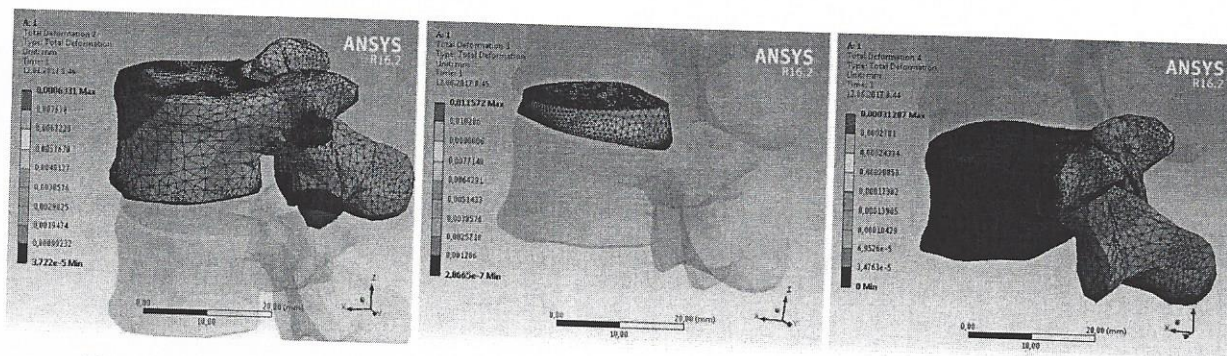


Рисунок 9 – Перемещения при I стадии спондилолистеза а) позвонке L3 б) межпозвонковом диске в) позвонке L4.

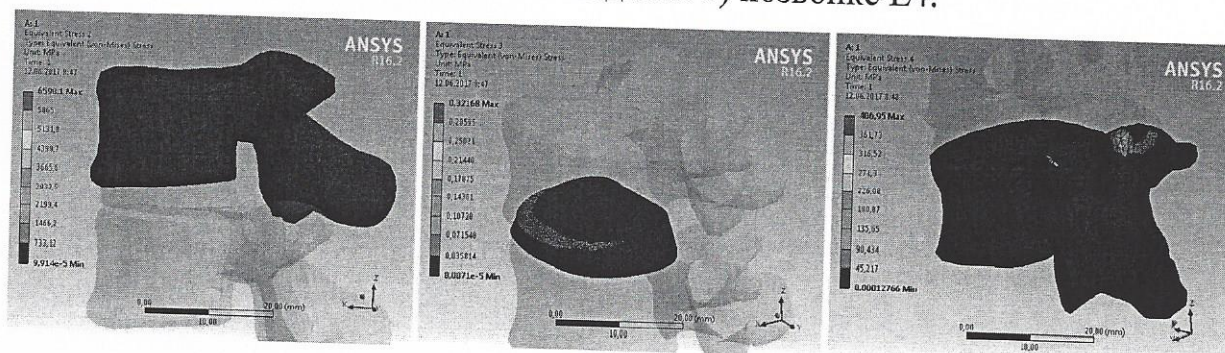


Рисунок 10 – Эквивалентные напряжения при I стадии спондилолистеза в а) позвонке L3 б) межпозвонковом диске в) позвонке L4.

В модели ПДС при наличии II стадии спондилолистеза максимальные значения перемещений наблюдаются в тех же самых участках что и при I

стадии спондилолистеза, но превосходят на 16% (рис. 11). Аналогично максимальные зоны эквивалентных напряжений при II стадии спондилолистеза проявляются в тех же местах, что и при I стадии спондилолистеза, но уменьшились почти на 40% (рис. 12).

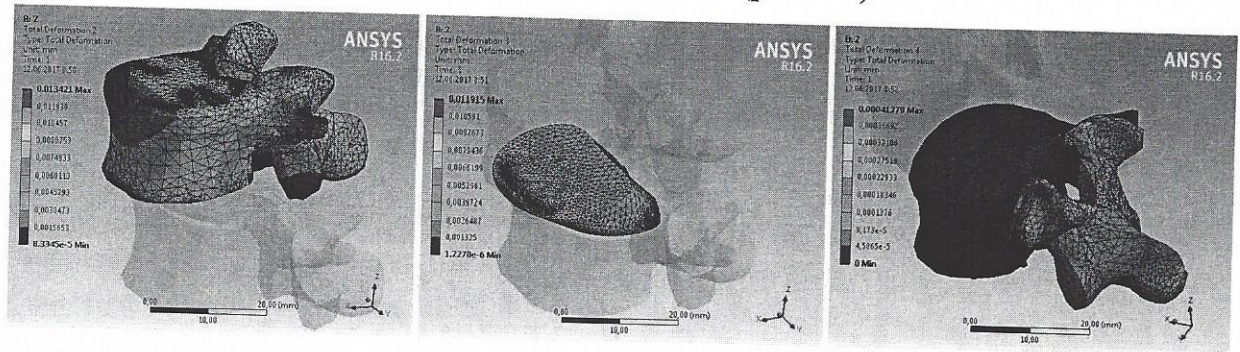


Рисунок 11– Перемещения при II стадии спондилолистеза в а) позвонке L3 б) межпозвонковом диске в) позвонке L4.

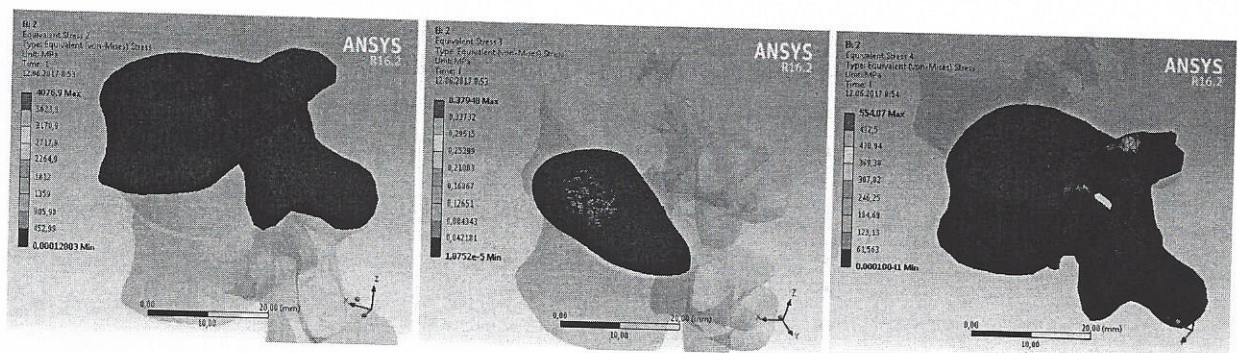


Рисунок 12 – Эквивалентные напряжения при II стадии спондилолистеза в а) позвонке L3 б) межпозвонковом диске в) позвонке L4.

К III стадии спондилолистеза модели ПДС возникают вторичные зоны максимумов на верхних суставных отростках и на остистом отростке позвонка L3, кроме того наблюдаются на краю верхней грани замыкательной пластины и на остистом отростке позвонка L4 (рис. 13). Эквивалентные напряжения достигаются на верхней грани замыкательной пластины и на передней поверхности позвонка L4 (рис. 14).

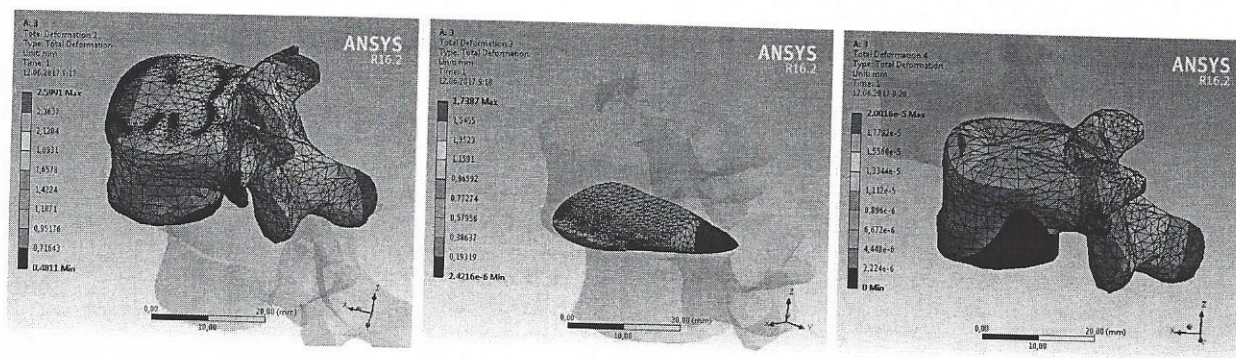


Рисунок 13– Перемещения при III стадии спондилолистеза в а) позвонке L3
б) межпозвонковом диске в) позвонке L4.

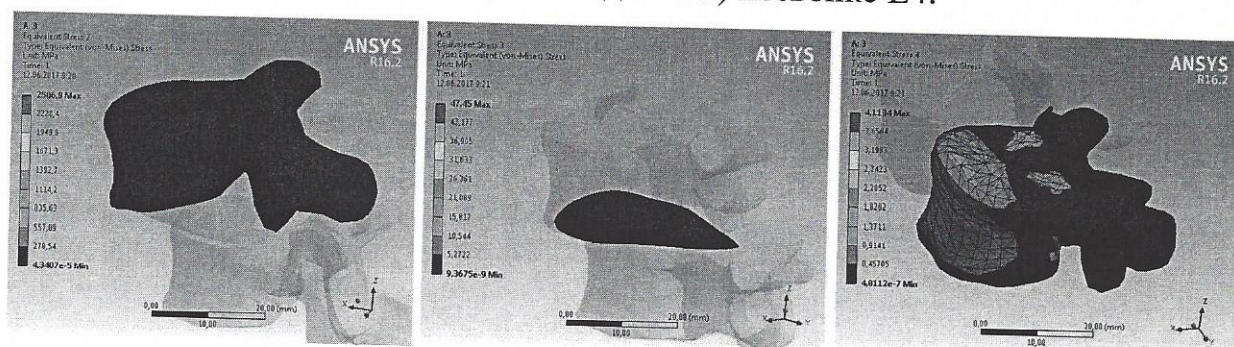


Рисунок 14 – Эквивалентные напряжения при III стадии спондилолистеза в а)
позвонке L3 б) межпозвонковом диске в) позвонке L4.

В модели ПДС при IV стадии спондилолистеза наблюдается частичное отломление отростков, так как происходит сильное смещение верхнего позвонка относительно нижнего (2,6 мм), зоны максимумов эквивалентны зонам максимумов при III стадии спондилолистеза (рис. 15). Зона максимума эквивалентных напряжений увеличивается относительно III стадии спондилолистеза, но при этом максимальные значения ниже в 13 раз (рис. 16).

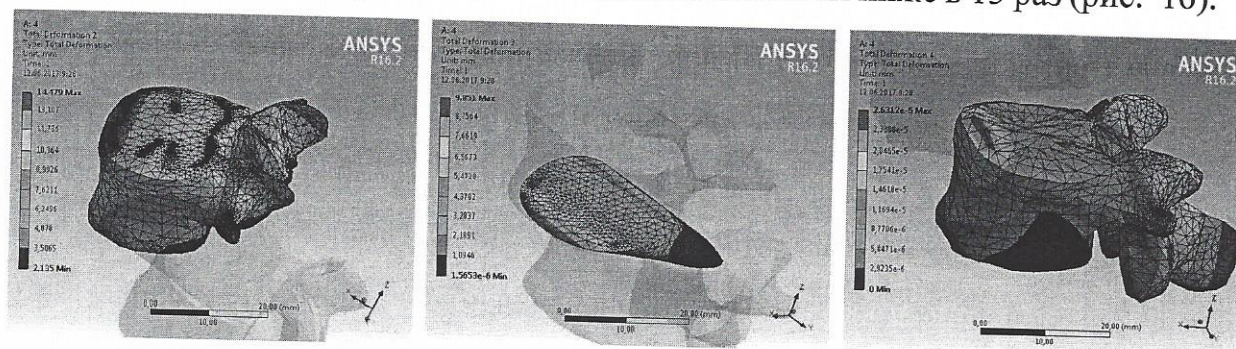


Рисунок 15– Перемещения в при IV стадии спондилолистеза а) позвонке L3
б) межпозвонковом диске в) позвонке L4.

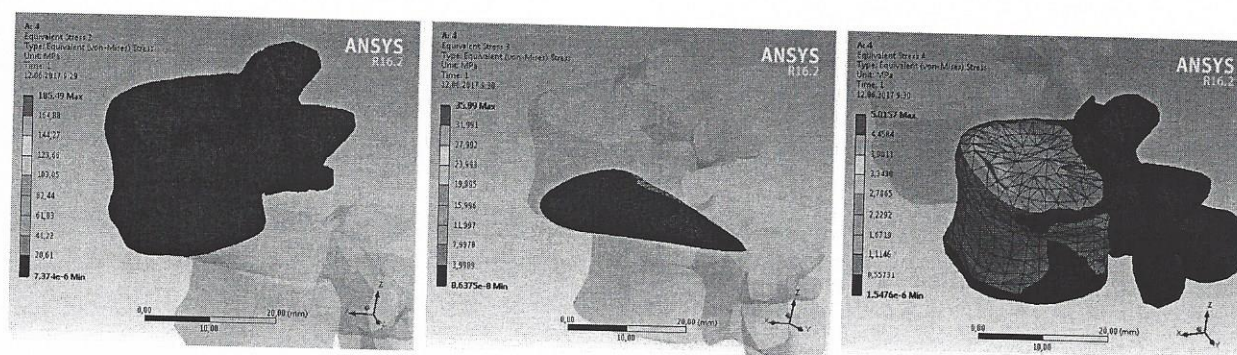


Рисунок 16 – Эквивалентные напряжения при IV стадии спондилолистеза в а) позвонке L3 б) межпозвонковом диске в) позвонке L4

В результате проведенного анализа максимальные и минимальные значения напряженно-деформированного состояния тканей ПДС были сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Максимальные эквивалентные напряжения и перемещения для сегмента позвоночника L3–L4

Модель	Перемещения (мм)	Эквивалентные напряжения (МПа)
ПДС в пределах нормы	0.0063522	681.97
I стадия спондилолистеза	0.011572	6598.1
II стадия спондилолистеза	0.013421	4076.9
III стадия спондилолистеза	2.5991	2506.9
IV стадия спондилолистеза	14.479	185.49

Заключение

В данной работе выполнено исследование нормальной и патологической анатомии и физиологии позвоночно-двигательного сегмента. Проведено трехмерное моделирование ПДС позвоночника L3-L4 в нормальном состоянии и 4 стадии спондилолистеза.

На основе построенных 3D моделей проведен численный эксперимент методом конечно-элементного моделирования. Анализ результатов позволил провести оценку напряженно-деформированного состояния и определить критические значения эквивалентных напряжений и деформаций для различных степеней спондилолистеза. Выявлено, что с увеличением степени

спондилолистеза деформации, возрастают а эквивалентные напряжения прямо пропорционально уменьшаются.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Клиника ОртоСпайн Анатомия и физиология позвоночника [Электронный ресурс] / URL: <http://www.orthospine.ru/default.aspx?did=534>(дата обращения 29.05.2017). Загл. с экрана. Яз. рус.
2. Доль, Е.С., Иванов Д.В. Моделирование поясничного отдела позвоночника методом конечных элементов. / Е.С. Доль, Д.В. Иванов // Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского, Россия. 2015.
3. Барыш, А.Е. Конечно-элементное бисегментарное моделирование позвоночных двигательных сегментов С4-С6 / А.Е. Барыш // Ортопедия, травматология и протезирование. 2005. № 1. С. 41-49.
4. Greaves, C.Y. A three-dimensional finite element model of the cervical spine with spinal cord: an investigation of three injury mechanisms / C.Y. Greaves, M.S. Gadala, T.R. Oxland // Annals of Biomedical Engineering. 2008. №36. P. 396-405.
5. Kallemeyn, N.A. An interactive multiblock approach to meshing the spine / N.A. Kallemeyn, S.C. Tadepalli, K.H. Shivanna, N.M. Grosland // Comput. Methods Programs Biomed. 2009. Vol. 95, № 3. P. 227-235.
6. Li, Y. Influence of surgical treatment for disc degeneration disease at C5-C6 on changes in some biomechanical parameters of the cervical spine / Y. Li, G. Lewis // Med. Eng. Phys. 2010. Vol. 32, № 6. P. 595-603.
7. Teo E.C. Effects of cervical cages on load distribution of cancellous core: a finite element analysis / E.C. Teo, K. Yang, F.K. Fuss et al. // J. Spinal Disord. Tech. 2004. Vol. 17, № 3. P. 226-231.

8. Википедия. Метод конечных элементов. [Электронный ресурс] / URL:

https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4_%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D0%B5%D1%87%D0%BD%D1%8B%D1%85_%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%82%D0%BE%D0%B2 (дата обращения 29.05.2017). Загл. с экрана. Яз. рус.

9. Официальный сайт Yourspine.ru [Электронный ресурс]: Смещение позвонков поясничного отдела. URL: <https://yourspine.ru/smeshhenie-rozvonkov-royasnichnogo-otdela.html> (дата обращения: 21.05.2017). Загл. с экрана. Яз. рус.

10. Доль, Е.С. Моделирование позвоночно-двигательного сегмента методом конечных элементов. / Е.С. Доль // Практическая биомеханика. Материалы докладов Всероссийской конференции молодых ученых с международным участием. Под редакцией Л.Ю. Коссовича, 2016. С. 5-8.

16.06.17 