

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.
ЧЕРНЫШЕВСКОГО»
Кафедра математической теории упругости и биомеханики

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, АЛГОРИТМЫ И
ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ЧИСЛЕННОГО АНАЛИЗА
ЭЛЕМЕНТОВ ПОЗВОНОЧНИКА С УСТАНОВЛЕННОЙ СИСТЕМОЙ
ФИКСАЦИИ**

АВТОРЕФЕРАТ

НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ
(ДИССЕРТАЦИИ)

аспиранта 4 курса
направления 09.06.01 – Информатика и вычислительная техника
направленности «Математическое моделирование, численные методы и
комплексы программ»

БЕСКРОВНОГО АЛЕКСАНДРА СЕРГЕЕВИЧА

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

Бессонов Л.В.

Зав. кафедрой,
д.ф.-м.н., профессор

Коссович Л.Ю.

Саратов 2021

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

В мире количество людей, получающих травмы позвоночника, растет в силу увеличивающегося ритма жизни. Ежегодно до 500 тыс. человек получают травму позвоночника.

Оказание современной и качественной помощи пострадавшим является актуальной и в то же время трудной задачей. Неэффективность консервативного лечения, появление оригинальных современных имплантатов значительно расширили показания для хирургического лечения различных нозологических форм. Этим обусловлена необходимость высокоточного планирования этапов вмешательства и учета анатомо-топографических, конструкционных и биомеханических особенностей различных отделов позвоночника при выборе имплантатов, используемых при хирургическом лечении.

Современные системы предоперационного планирования обеспечивают только геометрическое планирование хирургического лечения и не позволяют выполнить численный анализ элементов позвоночника с системой фиксации. Более того - системы не имеют автоматизированного процесса создания твердотельных моделей, а только полуавтоматические методы создания поверхностных моделей.

Цель исследования – разработать алгоритм построения и численного анализа модели элементов позвоночника с системой фиксации.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

1. выполнение постановки задачи численного анализа модели элементов позвоночника с установленной системой фиксации;
2. разработка алгоритма автоматизированного построения твердотельных моделей позвонков по данным компьютерной томографии;
3. определение принципов назначений граничных условий, соответствующих физиологическим нагрузкам в покое;
4. разработка программного комплекса, реализующего: автоматизированное распознавание позвонков и достройку систем фиксации и межпозвонковых дисков; назначение механических свойств и граничных условий; построение вычислительной сетки; численное решение поставленной задачи; визуализацию результатов решения.

Научная новизна. Разработан алгоритм моделирования позвоночника с системой фиксации с применением автоматизированного распознавания позвонков по данным компьютерной томографии. Реализован алгоритм автоматизированного распознавания позвонков по данным компьютерной томографии. Разработан алгоритм, позволяющий автоматизировать процесс построения твердотельной модели в плоском и пространственном случаях.

Практическая значимость результатов работы. Практическая значимость результатов работы заключается в создании отдельных компонентов системы биомеханической поддержки выбора варианта хирургического лечения, а именно: модуль твердотельных моделей, сеточный и расчетный модули.

Объекты исследования. Объектами исследования являются элементы позвоночного столба (позвонки, межпозвонковые диски) и элементы систем фиксации (винты, стержни).

Материалы и методы исследования. Построение твердотельной модели исследования выполнено в разработанном программном комплексе (модуль твердотельных моделей). Распознавание геометрии тел позвонков выполнено на основе данных компьютерной томографии в виде DICOM-файлов с применением сверточных нейронных сетей. Модуль твердотельных моделей содержит инструменты для построения твердотельных моделей межпозвонковых дисков. Для фиксации использованы твердотельные модели систем фиксации (винты, стержни).

Математически поведение модели описывается задачей теории упругости в статической постановке.

Решение поставленной задачи выполнено численно с использованием метода конечных элементов. Генерирование вычислительной сетки (сеточный модуль) и численное решение (расчетный модуль) выполнено в разработанном программном комплексе.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. результаты разработки автоматического метода построения твердотельных моделей элементов позвоночника по данным КТ с применением нейросетевых технологий;
2. данные по принципам назначения граничных условий, соответствующих физиологическим нагрузкам в покое;
3. основные положения реализации программного комплекса расчёта НДС элементов позвоночника с системой фиксации. А именно, разработка модуля твердотельных моделей, сеточного и расчетного модулей.

Достоверность и обоснованность. Достоверность и обоснованность результатов исследования обеспечивается корректностью математической постановки задачи теории упругости, применением строгих математических методов, сравнением результатов с известными результатами других авторов, а также с результатами медицинских контролей.

Личный вклад. Автор лично разработал алгоритм, позволяющий автоматизировать процесс построения твердотельной модели в плоском и пространственном случаях, выполнил все описанные в работе численные расчеты на разработанном программном комплексе. В выполненных в соавторстве работах соискателю в равной степени принадлежат как постановка задачи, так и результаты выполненных исследований.

Публикации. Основное содержание работы опубликовано в 5 печатных работах, из них 2 статьи в рецензируемых журналах, входящих в перечень журналов, рекомендуемых ВАК, 3 статьи в рецензируемых журналах. Получено 8 свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ и 4 для БД, написанных по результатам исследований, приведённых в работе.

Объем и структура работы. Работа состоит из списка сокращений, введения, 4 глав, заключения, списка литературы и 3 приложений. Общий объем

работы составляет 115 страниц, 33 рисунка, 4 таблицы, 15 страниц библиографии, включающей 85 наименований.

Содержание работы

Введение содержит постановку задачи, краткий обзор исследований, непосредственно примыкающих к теме диссертации, а также анализ полученных результатов с точки зрения их новизны по сравнению с известными, приводится краткое содержание работы.

В первой части работы рассматриваются типы объектов исследования, их механические свойства. Описываются контактные взаимодействия между телами и определяются принципы приложения нагрузок и граничных условий, ставится математическая постановка задачи.

Вторая часть работы содержит результаты адаптации нейронных сетей к автоматическому распознаванию тел позвонков на основе данных компьютерной томографии (КТ). Для плоского случая выбрана нейронная сеть Mask-RCNN, а для пространственного случая 3D Convolutional Neural Network и U-Net. Нейронные сети обучены на персональном компьютере с процессором Intel (R) Core (TM) i7-8700K, частотой 3.70 ГГц и оперативной памятью 32 ГБ. Набор данных для обучения был размечен практикующими врачами.

На рисунках 1 и 2 представлены блок-схемы алгоритмов автоматизации процесса построения твердотельных моделей для плоского и пространственного случаев.

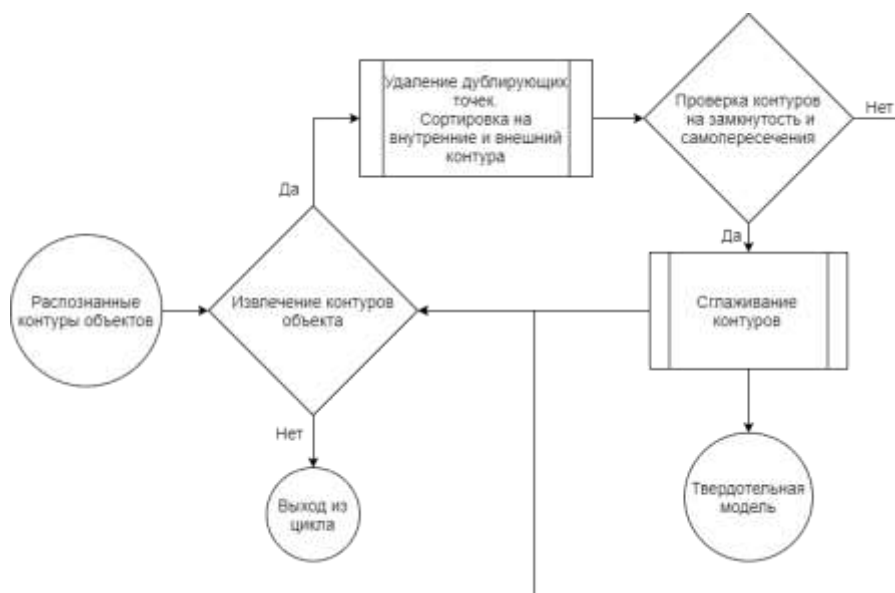


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма преобразования распознанных контуров в твердотельные модели для плоского случая

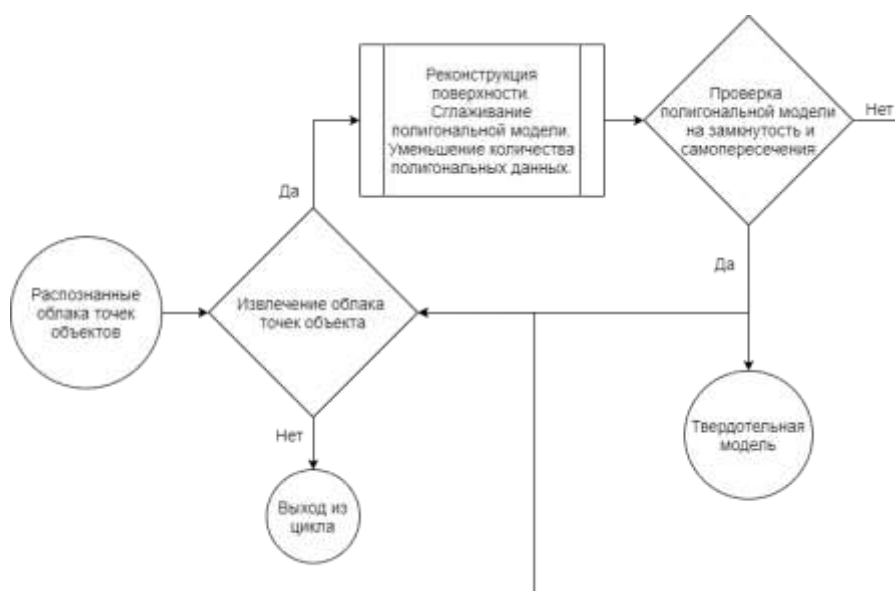


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма преобразования распознанных облаков точек в твердотельные модели для пространственного случая

Реализовано программное обеспечение (ПО) - модуль твердотельных моделей, позволяющее автоматизировать процесс построения твердотельных моделей элементов позвоночника. Модуль твердотельных моделей входит в состав системы поддержки принятия врачебных решений, которая позволяет выполнить предоперационное планирование посредством биомеханики. Для реализации модуля твердотельных моделей, входящего в состав ПО, была выбрана сервис-ориентированная архитектура. Распознавание медицинских изображений производится автоматизировано сервисом, развёрнутым на высокопроизводительной программно-аппаратной платформе, посредством обученной нейронной сети. Результат распознавания тел позвонков, для двух случаев, представлен на рисунке 3.

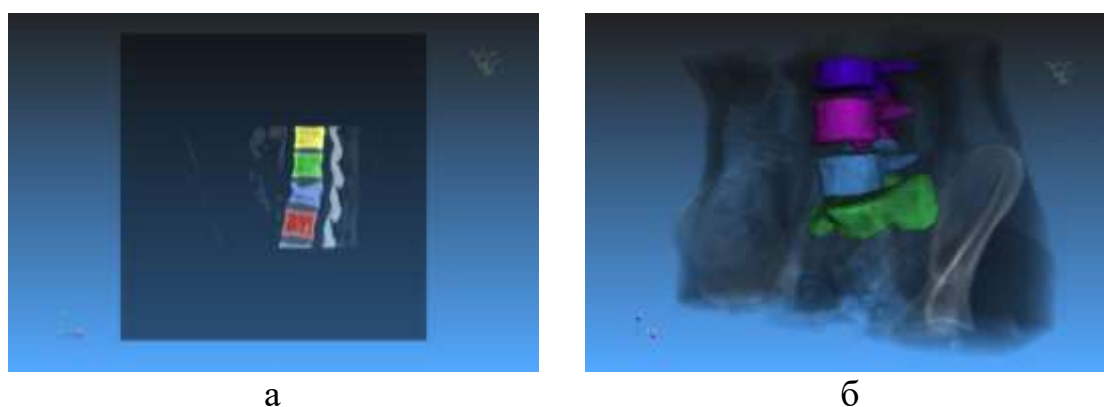


Рисунок 3 – Твердотельные модели позвонков: плоский случай (а), пространственный случай (б)

Для решения задач машинного обучения применены следующие библиотеки:

1. TensorFlow – открытая программная библиотека для машинного обучения, разработанная для решения задач построения и тренировки нейронной сети, в проекте применена её Python-адаптация;
2. Keras – открытая нейросетевая библиотека для эффективной разработки нейронных сетей глубокого обучения;
3. NumPy – открытая программная библиотека, содержащая общие математические и числовые операции в виде пре-скомпилированных, быстрых функций;
4. Pydicom – открытая программная библиотека, содержащая инструменты для работы с DICOM данными;
5. SimpleITK – открытая программная библиотека, содержащая набор инструментов для анализа изображений с большим количеством компонентов, поддерживающих общие операции фильтрации.

Для визуализации данных применены следующие библиотеки:

1. VTK – открытая кроссплатформенная библиотека для трёхмерного моделирования, обработки изображений и прикладной визуализации, исходным языком библиотеки является C++, поэтому для применения её в проекте на языке Python была применена Python-адаптация;
2. PyQT – Python-адаптация GUI-библиотеки Qt с открытым исходным кодом, которая также функционирует как кроссплатформенная среда разработки приложений.

Качество автоматического распознавания КТ позвоночника и создания твердотельных моделей позвонков оценивалось по следующей методике:

1. автоматически распознавались КТ позвоночника и создавались твердотельные модели позвонков;
2. в ручном режиме создавались твердотельные модели позвонков для тех же КТ в системе Mimics.
3. для каждой пары позвонков (ручной режим и автоматический) рассчитывался коэффициент Сёренсена, который вычислялся по формуле:

$$K(A, B) = 2 \frac{|A \cap B|}{|A| + |B|},$$

где A – множество пикселей, ограниченное площадью (плоский случай) или объемом (пространственный случай), созданное в ручном режиме; B – множество пикселей, ограниченное площадью (плоский случай) или объемом (пространственный случай), созданное в автоматическом режиме; $A \cap B$ – множество пикселей, общих для A и B .

Точность автоматического распознавания тел позвонков составляет 94 %, что является хорошим результатом в сравнении с другими исследованиями. Пример подготовленных твердотельных моделей, в разработанном модуле, для численного анализа, представлен на рисунке 4.

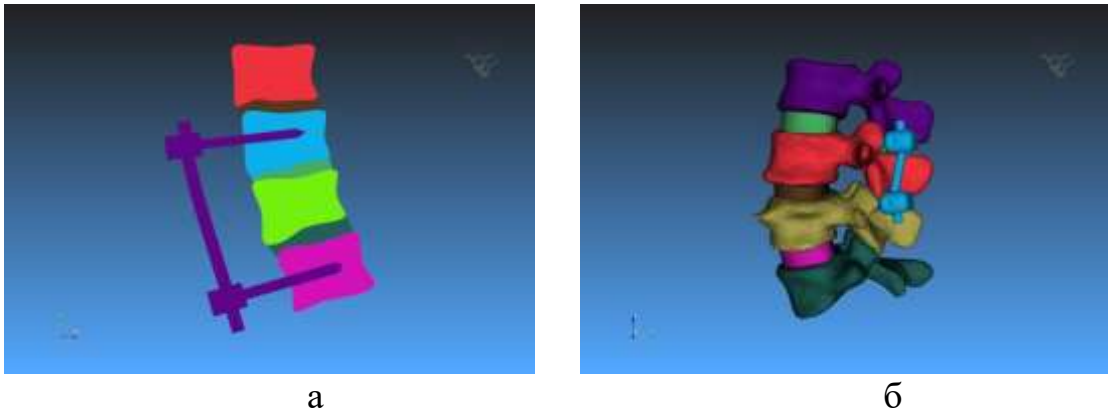


Рисунок 4 – Твёрдотельные модели для численного анализа: плоский случай (а), пространственный случай (б)

В третьей части работы представлена реализация ПО – сеточный и расчетный модули, позволяющие создать вычислительную сетку и оценить напряженно-деформированное состояние (НДС) элементов позвоночника с системой фиксации.

Эффективность хирургического лечения поврежденных отделов позвоночника зависит от практичности компоновки фиксирующих конструкций, уровня установки и степени погруженности фиксирующих конструкций, а также соблюдения предписанного физического режима пациентом в период реабилитации. Избежать ошибок, способствующих появлению послеоперационных осложнений, помогает предоперационное планирование с применением численного анализа твердотельной модели конкретного пациента.

При выполнении расчетов, связанных с анализом прочности систем фиксации, на практике используют численные методы. Применение численных методов, к которым относятся методы конечных разностей, конечных элементов, граничных элементов и др., не ограничено ни сложностью геометрии тела, ни способами приложения нагрузок.

Сеточный модуль предназначен для создания вычислительной сетки в плоском и пространственном случаях. В плоском случае должны создаваться треугольные сетки, в пространственном – тетраэдрические. Создание вычислительной сетки является необходимым этапом решения задачи при помощи метода конечных элементов (МКЭ). Расчетный модуль позволяет численно решить задачу и оценить НДС элементов позвоночника с системой фиксации в плоском и пространственном случаях.

Задача теории упругости решается численно в перемещениях. Для каждого узла вычислительной сетки рассчитывается модуль вектора полных перемещений в соответствии с приведенной ниже формулой:

$$|u_i| = \sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}.$$

Компоненты тензора малых деформаций рассчитываются через полученные значения перемещений в векторной форме в каждом узле вычислительной сетки. Затем рассчитываются эквивалентные деформации по Мизесу для каждого узла вычислительной сетки по формуле:

$$\begin{aligned}\varepsilon_{eq} &= \frac{2}{3} \sqrt{\frac{3(e_{xx}^2 + e_{yy}^2 + e_{zz}^2)}{2} + \frac{3(\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2)}{4}}, \\ e_{xx} &= \frac{2}{3}\varepsilon_{xx} - \frac{1}{3}\varepsilon_{yy} - \frac{1}{3}\varepsilon_{zz}, \\ e_{yy} &= -\frac{1}{3}\varepsilon_{xx} + \frac{2}{3}\varepsilon_{yy} - \frac{1}{3}\varepsilon_{zz}, \\ e_{zz} &= -\frac{1}{3}\varepsilon_{xx} - \frac{1}{3}\varepsilon_{yy} + \frac{2}{3}\varepsilon_{zz}, \\ \gamma_{xy} &= 2\varepsilon_{xy}.\end{aligned}$$

Компоненты тензора напряжений рассчитываются через полученные значения перемещений в векторной форме в каждом узле вычислительной сетки. Через тензор напряжений рассчитываются эквивалентные напряжения по Мизесу для каждого узла вычислительной сетки:

$$\begin{aligned}\sigma_{eq} &= \frac{2}{3} \sqrt{\frac{3(s_{xx}^2 + s_{yy}^2 + s_{zz}^2)}{2} + 3(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{zx}^2)}, \\ s_{xx} &= \frac{2}{3}\sigma_{xx} - \frac{1}{3}\sigma_{yy} - \frac{1}{3}\sigma_{zz}, \\ s_{yy} &= -\frac{1}{3}\sigma_{xx} + \frac{2}{3}\sigma_{yy} - \frac{1}{3}\sigma_{zz}, \\ s_{zz} &= -\frac{1}{3}\sigma_{xx} - \frac{1}{3}\sigma_{yy} + \frac{2}{3}\sigma_{zz}.\end{aligned}$$

Процесс генерации вычислительной сетки и решения задачи производится сервисом, развёрнутым на высокопроизводительной программно-аппаратной платформе, посредством REST API.

Разработка сеточного и расчетного модулей осуществлялась на базе свободно распространяемого программного обеспечения:

1. Netgen/NGSolve – это открытое высокопроизводительное конечно-элементное программное обеспечение. Оно широко используется для анализа моделей механики твердого тела, гидродинамики и электромагнетизма;
2. TetGen – открытая программная библиотека для создания тетраэдрических сеток любых трехмерных геометрий. TetGen генерирует тетраэдры Делоне, согласованные с границами сетки Делоне и разбиением Вороного.

Для визуализации данных применены следующие библиотеки:

1. VTK – открытая кроссплатформенная библиотека для трёхмерного моделирования, обработки изображений и прикладной визуализации, исходным языком библиотеки является C++, поэтому для применения её в проекте на языке Python была применена Python-адаптация;
2. PyQt – Python-адаптация GUI-библиотеки Qt с открытым исходным кодом, которая также функционирует как кроссплатформенная среда разработки приложений.

Пример созданных вычислительных сеток, в разработанном модуле представлен на рисунке 5. Пример решения задач в перемещениях представлен на рисунке 6.

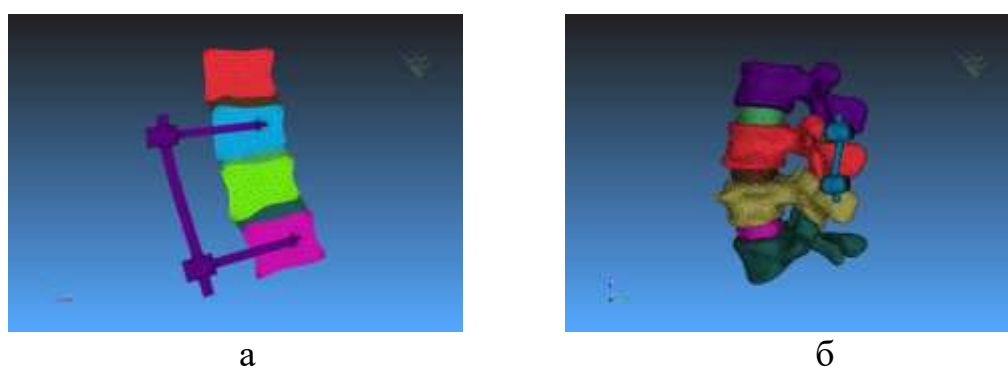


Рисунок 5 – Вычислительные сетки для численного анализа: плоский случай (а), пространственный случай (б)

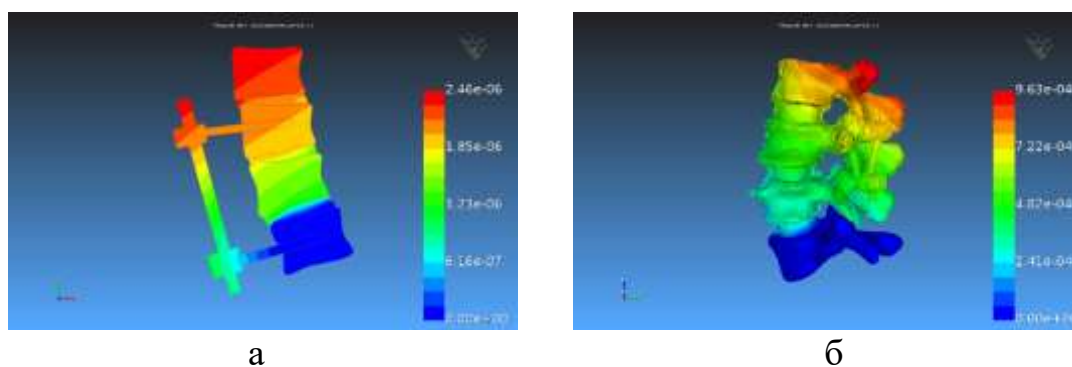


Рисунок 6 – Решения задач в перемещениях: плоский случай (а), пространственный случай (б)

Четвертая часть работы содержит результаты применения разработанного программного комплекса для выбора оптимального варианта лечения в плоском и пространственном случаях, для нескольких пациентов. Механические свойства материалов представлены в таблице 1. Для каждого пациента были предоставлены:

1. КТ пояснично-крестцового отдела позвоночника в формате DICOM;

- несколько возможных вариантов хирургического реконструктивного лечения травмы или дегенеративно-дистрофического заболевания пояснично-крестцового отдела позвоночника с указанием мест установки имплантатов, в том числе наименования и описания характеристик имплантатов, планируемых к установке.

Таблица 1 – Механические свойства материала

Материал	Модуль Юнга, МПа	Коэффициент Пуассона
Кортикальный слой	12000	0.3
Межпозвонковый диск	25	0.49
Кейдж	4000	0.3
Титан	112000	0.32

В плоском случае, для моделирования предоставлен пациент с диагнозом – остеохондроз пояснично-крестцового отдела позвоночника с поражением сегментов L4-S1, спондилоартроз. Запланированы следующие варианты хирургического лечения:

- коррекция, фиксация пояснично-крестцового отдела позвоночника в сегментах L4-L5-S1;
- коррекция, фиксация пояснично-крестцового отдела позвоночника в сегментах L4-L5-S1 и установка кейджа на уровне L4-L5;
- коррекция, фиксация пояснично-крестцового отдела позвоночника в сегментах L4-L5 и установка кейджа на уровне L4-L5.

На основе данных КТ, в модуле твердотельных моделей были построены плоские твердотельные модели сегмента позвоночника L4-S1. В соответствии с запланированными вариантами лечения в моделях были установлены имплантаты. Полученные модели представлены на рисунке 7.



Рисунок 7 – Пациенто-ориентированные твердотельные модели: вариант 1 (а), вариант 2 (б), вариант 3 (в)

К каждому позвонку исследуемого сегмента прикладывалась следящая нагрузка величиной 100 Н. Нижняя замыкательная пластина позвонка S1 жестко закреплялась. Материалы позвонков, межпозвонковых дисков и имплантатов -- линейно-упругие, изотропные и однородные.

В сеточном модуле сгенерирована треугольная вычислительная сетка для каждой модели рассмотренных вариантов лечения. Решение задачи для каждого варианта лечения выполнено в расчетном модуле. В результате моделирования рассчитаны поля напряжений и перемещений, представленные на рисунке 8.

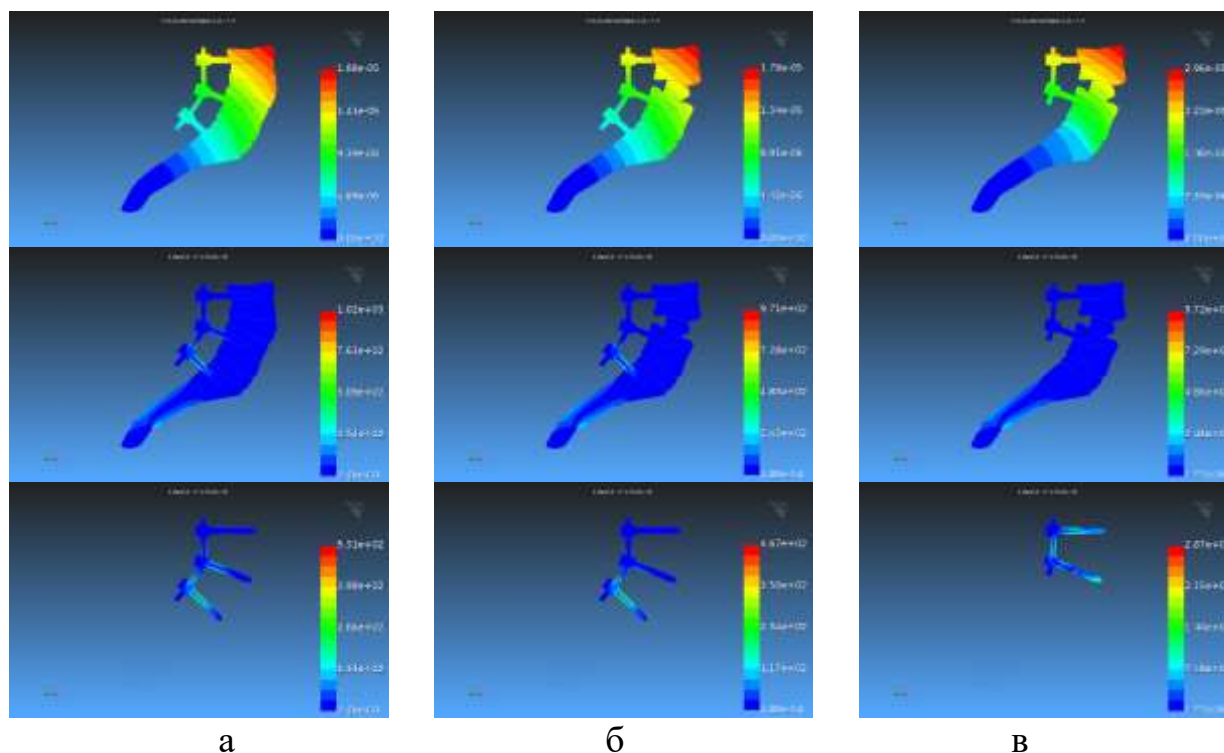


Рисунок 8 – Поля перемещений и напряжений по Мизесу: вариант 1 (а), вариант 2 (б), вариант 3 (в)

Численный анализ, в разработанном программном комплексе, позволил установить, что вариант с коррекцией и фиксацией пояснично-крестцового отдела позвоночника в сегментах L4-L5, с установкой кейджа на уровне L4-L5 является наиболее оптимальным, т.к. напряжения возникающие в установленных имплантатах ниже по сравнению с другими вариантами.

В пространственном случае, для моделирования предоставлен пациент с диагнозом – остеохондроз поясничного отдела позвоночника с преимущественным поражением L5-S1 диска. Запланированы следующие варианты хирургического лечения:

1. фиксация позвонков L5 и S1, дискэктомия L5-S1 и установка одного кейджа;
2. фиксация позвонков L5 и S1, дискэктомия L5-S1 и установка двух кейджей.

Пространственные твердотельные модели позвонков L3-S1 построены в модуле твердотельных моделей. В модели позвонков установлены имплантаты в соответствии с вариантами лечения и достроены межпозвонковые диски. Твердотельные модели для численного анализа представлены на рисунке 9.

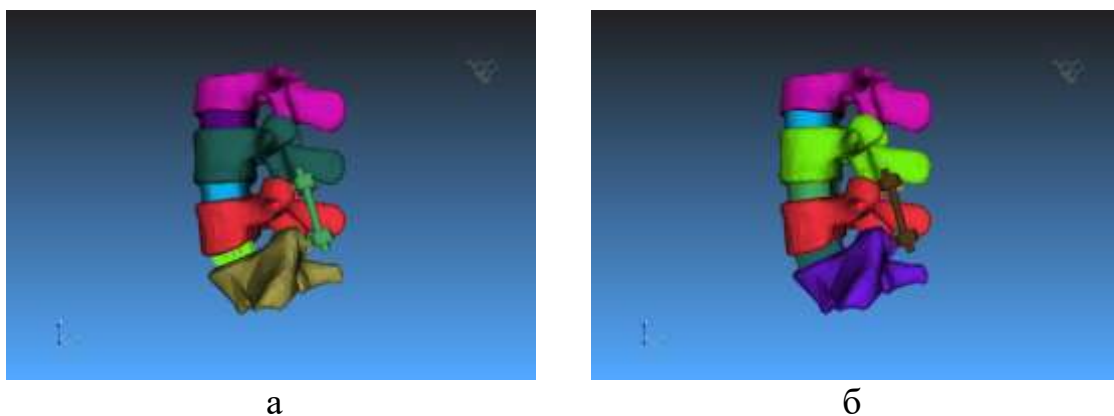


Рисунок 9 – Пациенто-ориентированные твердотельные модели: вариант 1 (а), вариант 2 (б)

К верхней замыкательной пластине позвонка L3 приложена осевая компрессионная нагрузка величиной 400 Н, соответствующая действию веса этого пациента в положении стоя. Нижняя замыкательная пластина позвонка S1 жестко закреплена. Материалы позвонков, межпозвонковых дисков и имплантатов – линейно-упругие, изотропные и однородные.

В сеточном модуле сгенерирована тетраэдральная вычислительная сетка для каждой модели рассмотренных вариантов лечения. Решение задачи для каждого варианта лечения выполнено в расчетном модуле. В результате моделирования рассчитаны поля напряжений и перемещений, представленные на рисунке 10.

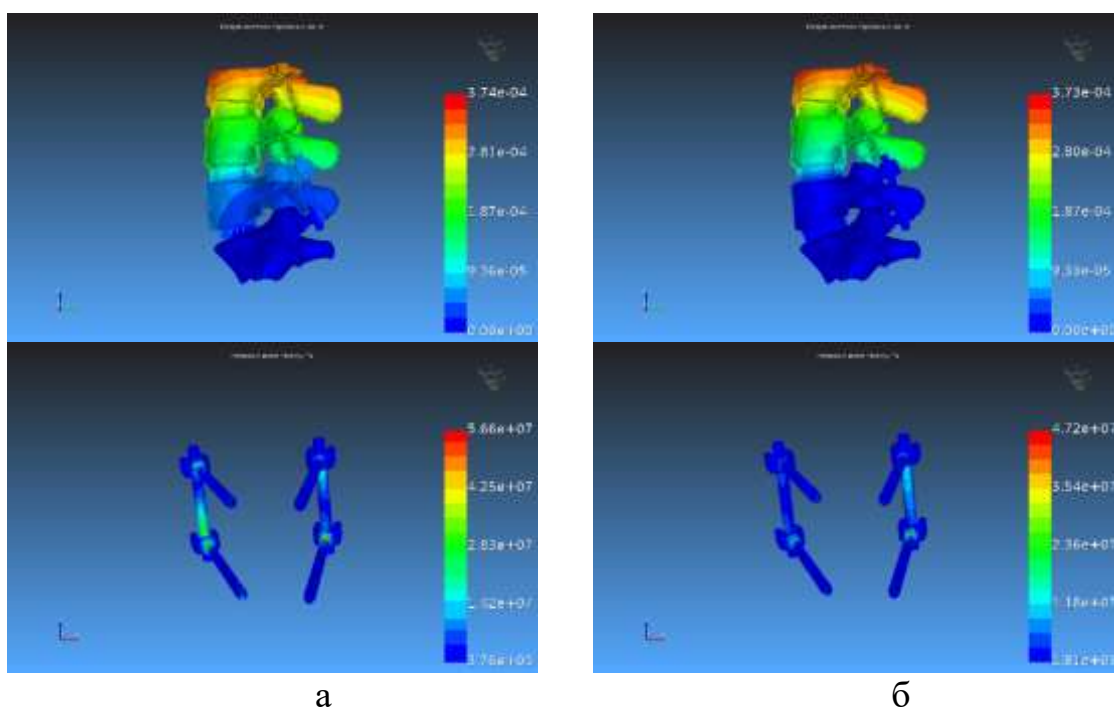


Рисунок 10 – Поля перемещений и напряжений по Мизесу: вариант 1 (а), вариант 2 (б)

Максимальные значения эквивалентных напряжений на имплантатах для второго варианта хирургического реконструктивного лечения значительно меньше по сравнению с первым вариантом. Максимальные величины эквивалентных напряжений для костной ткани не превышают критических значений, которые могут привести к их разрушению. Численный анализ позволил установить, что вариант хирургического реконструктивного лечения с фиксацией и двумя кейджами является наиболее рациональным.

В заключении приводятся основные результаты и делаются выводы. Основные результаты и выводы:

1. выполнена постановка задачи численного анализа модели элементов позвоночника с установленной системой фиксации;
2. разработаны алгоритмы автоматизированного построения твердотельных моделей позвонков по данным компьютерной томографии;
3. определены принципы назначения граничных условий, соответствующих физиологическим нагрузкам в покое и разработаны алгоритмы переноса граничных условий на вычислительную сетку;
4. разработан программный комплекс, реализующий: автоматизированное распознавание позвонков и достройку систем фиксации и межпозвоночных дисков; назначения механических свойств и граничных условий; построение вычислительной сетки; численное решение поставленной задачи; визуализацию результатов решения.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (ДИССЕРТАЦИИ)

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ:

1. *Бескровный А. С., Бессонов Л. В., Иванов Д. В., Кириллова И. В., Коссович Л. Ю.* Использование сверточной нейронной сети для автоматизации построения двумерных твердотельных моделей позвонков // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Математика. Механика. Информатика. 2020. Т. 20, вып. 4. С. 502-516. DOI: 10.18500/1816-9791-2020-20-4-502-516
2. *Бескровный А. С., Бессонов Л. В., Иванов Д. В., Золотов В. С., Сидоренко Д. А., Кириллова И. В., Коссович Л. Ю.* Построение трехмерных твердотельных моделей позвонков с использованием сверточных нейронных сетей // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Математика. Механика. Информатика. (В печати)

В прочих изданиях:

3. *Бескровный А.С., Бессонов Л.В., Голядкина А.А., Доль А.В., Иванов Д.В., Кириллова И.В., Коссович Л.Ю., Сидоренко Д.А.* Разработка системы поддержки принятия врачебных решений в травматологии и ортопедии. Биомеханика как инструмент предоперационного планирования // Российский журнал биомеханики. 2021. -Т. 25, вып. 2: -С. 118–133. DOI: 10.15593/RZhBiomeh/2021.2.01

4. *Beskrovny A.S., Makhankov A.V., Bessonov L.V., Lemeshkin M.O.* Application of artificial neural network technologies to vertebral segmentation according on CT data // Proceedings of the SPIE. 2020. -V.~11229. -P.~7. DOI: 10.1117/12.2545001.
5. *Beskrovny A., Dol D., Dol A., Bessonov L., Ivanov. D., Falkovich A., Ostrovsky N.* Methods of constructing an outline simple closed contour for modeling functional spine unit on CT slice. Proceedings of the SPIE - 2020. -V. 11229. - P. 7. DOI: 10.1117/12.2545013.