

# ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОЗВОНКА ЧЕЛОВЕКА НА ОСНОВЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ

Курочка К. С., Карабчикова Е. А.

Кафедра информационных технологий, Гомельский государственный технический университет имени  
П.О. Сухого

Гомель, Республика Беларусь

E-mail: kurochka@gstu.by, karabchicova.ru@mail.ru

*Предложен алгоритм построения трехмерной конечно-элементной модели позвонка на основе анализа снимков компьютерной томографии. Представлены результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния позвонка человека, позволяющие выявить зоны наибольших напряжений, что может быть использовано для профилактики и диагностики заболеваний позвоночника человека.*

## ВВЕДЕНИЕ

Существуют различные методы, позволяющие изучать состояние и поведение позвоночника человека и оценивать эффективность процедур по лечению его заболеваний. При диагностике заболеваний позвоночника используют рентгенографию, компьютерную и магнитно-резонансную томографию (КТ и МРТ), на основе которых можно диагностировать травмы, дегенеративные состояния позвоночника, наблюдать динамику лечения.

Однако, заболевания позвоночника развиваются постепенно и дают о себе знать резкими болями, когда болезнь уже прогрессирует, поэтому очень важно иметь возможность предугадывать малейшие изменения состояния позвоночника.

В последнее время в биомеханике все чаще стал применяться метод конечных элементов, который используется для изучения напряженно-деформированного состояния любого твердого материала, в частности, для выполнения экспресс-расчетов на прочность. Этот факт позволяет проводить исследования костей при различных условиях нагружения, что способствует более эффективной оценке состояния костной ткани, выявлению заболеваний и прогнозированию риска травм и переломов в будущем.

## I. ОБРАБОТКА КТ-ИЗОБРАЖЕНИЙ

Все современные томографы работают с файлами специализированного формата DICOM, в котором содержится информация о пациенте и исследовании, а также полученное рентгеновское изображение. Данный метод хранения информации уменьшает число возможных ошибок при работе, т. к. справочная информация не может быть отделена от самого изображения.

На этапе регистрации изображений аппаратными средствами при томографическом исследовании, а также при передаче сигналов по

линиям связи возникают шумы и помехи. С целью устранения данных эффектов производится цифровая обработка изображения. Ее основной задачей является эффективное подавление шума при сохранении важных для последующего распознавания элементов изображения [1-2].

Анализ медицинского изображения, который заключается в распознавании определенных анатомических единиц, запечатленных на снимке, осуществляется через алгоритмы сегментации, которые позволяют выделять области (группы пикселей) с определенными свойствами. Такие области на медицинском изображении соответствуют информативным структурам (тканям, волокнам, клеткам, их структурам и объединениям или органам). Степень детализации выделяемых характеристик зависит от конкретной задачи. Поэтому не существует отдельного метода или алгоритма, подходящего для решения всех типов задач сегментации — каждый из методов имеет свои достоинства и недостатки [3].

Результатом сегментации является бинарное или иерархическое изображение, в котором каждый уровень (фаза) изображения соответствует конкретному классу выделенных объектов. Сегментация является сложным моментом в обработке и анализе медицинских изображений биологической ткани, так как необходимо выделять области, соответствующие различным объектам или структурам на гистологических препаратах: клеткам, органоидам, артефактам и т. д. Это связано с высокой вариабельностью их характеристик, слабой контрастностью обрабатываемых изображений и сложной геометрической организацией объектов. Однако, элементы изображения, соответствующие костной ткани на снимках компьютерной томографии, резко контрастируют в сравнении с остальными анатомическими объектами, что связано с особенностями представления цвета на КТ снимке, который хранит в себе значение рентгеновской плотности запечатленного объекта. Это позволя-

ет осуществлять детектирование костной ткани путем подбора оптимального значения плотности (цвета), которое используется в качестве порогового и позволяет отличить необходимые исследуемые объекты от фона.

## II. ПОСТРОЕНИЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ ПОЗВОНКА ЧЕЛОВЕКА

Большинство современных медицинских программ позволяют проводить 3D реконструкцию различных анатомических структур по серии снимков КТ. Их основная цель – визуализация данных томографического исследования, что помогает врачам интерпретировать результаты при диагностике заболеваний. Данная процедура основана на понятии воксельного рендеринга. Воксель является полным аналогом пикселя в трёхмерном пространстве и перенимает у него практически все характеристики, что позволяет смело проводить аналогии с учетом размерности графического пространства.

Метод воксельного рендеринга может быть использован при построении конечно-элементной модели. С точки зрения геометрии воксель может представлять собой разнообразные фигуры, наиболее распространена кубическая форма или форма параллелепипеда, что хорошо вписывается в понятие конечного элемента. Однако, сами по себе воксели, как и пиксели, не содержат информацию о своих координатах в пространстве. Их координаты вычисляются относительно позиции в трехмерной матрице – структуре, моделирующей объемный объект. В то время как представление о положении конечного элемента в сетке строго описывается координатами его узлов. Таким образом, построение конечно-элементной модели можно свести к процедуре замены пикселей на соответствующие воксели, размер которых рассчитывается по данным DICOM файла (расстояние между пикселями на исходном изображении и расстояние между соседними слоями) и с сохранением позиции для каждого вокселя относительно глобальной системы координат.

## III. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для построения конечно-элементной модели позвонка человека использовались данные тестового набора их 85 снимков компьютерной томографии. Расчет напряженно-деформированного состояния производился с использованием открытого конечно-элементного пакета FreeFem.

На рисунке 1 показаны результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния позвонка человека.

Распределение напряжений в позвонке человека представлено на рисунке 2.

```
E = 1.61e+008
sigma = 0.25
Ftot = 2e+006
Pres = 2122.06
mu = 6.44e+007
lambda = 6.44e+007
-- Solve :
min -3.98899e+014 max 5.67517e+014
Max.desplazamientos:
dxmax=5.67517e+014
dymax=5.67517e+014
dzmax=5.67517e+014
-- FESpace: Nb of Nodes 43089 Nb of DoF 43089
sigmavm max=1.23068e+009
sigmavm min=2797.58
FS max=41.2775
FS min=9.38319e-005
freeglut (ffglut): fgInitGL2: fghGenBuffers is NULL
times: compile 1.304s, execution 80.374s, mpirank:0
```

Рис. 1 – Результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния позвонка человека

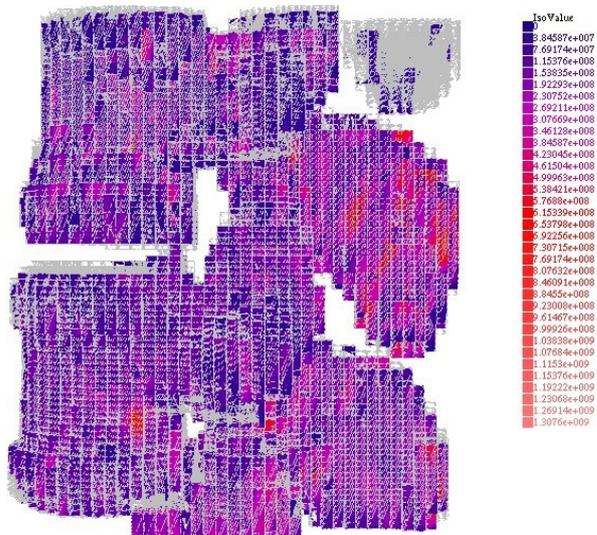


Рис. 2 – Распределение напряжений в позвонке человека

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании конечно-элементной модели сегмента позвоночника и результатов исследования его напряженно-деформированного состояния специалист сможет делать выводы о наличии заболевания.

Путем создания моделей позвоночника и применяя к ним метод конечных элементов становится возможным проведение исследований для определения риска заболеваний опорно-двигательного аппарата, а также для оценки эффективности предпринимаемых мер. Также это обеспечивает получение огромного количества дополнительной информации о поведении позвоночника при различных нагрузках, что является значимым дополнением к клиническим исследованиям.

1. Красильников, Н. Н. Цифровая обработка 2D- и 3D-изображений / Н. Н. Красильников – БХВ-Петербург, 2011. – 608 с.
2. Яне, В. Цифровая обработка изображений / В. Яне. – М.: Техносфера, 2007. – 584 с.
3. Недзьведь, А. М. Анализ изображений для решения задач медицинской диагностики / А. М. Недзьведь, С. В. Абламейко – ОИПИ НАН Беларуси, 2012. – 240 с.