

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРВИЧНОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ АНАТОМИЧЕСКИ АДАПТИРОВАННЫХ КЛИНОВИДНЫХ КЕЙДЖЕЙ С ПОЗВОНКАМИ ПОЯСНИЧНОГО ОТДЕЛА ПОЗВОНОЧНИКА

А.Н. Брехов, С.Л. Елисеев, М.И. Калинин, А.М. Поляков, В.И. Пахалюк

Крымский государственный медицинский университет им. С.И. Георгиевского, г. Симферополь  
Севастопольский национальный технический университет, г. Севастополь

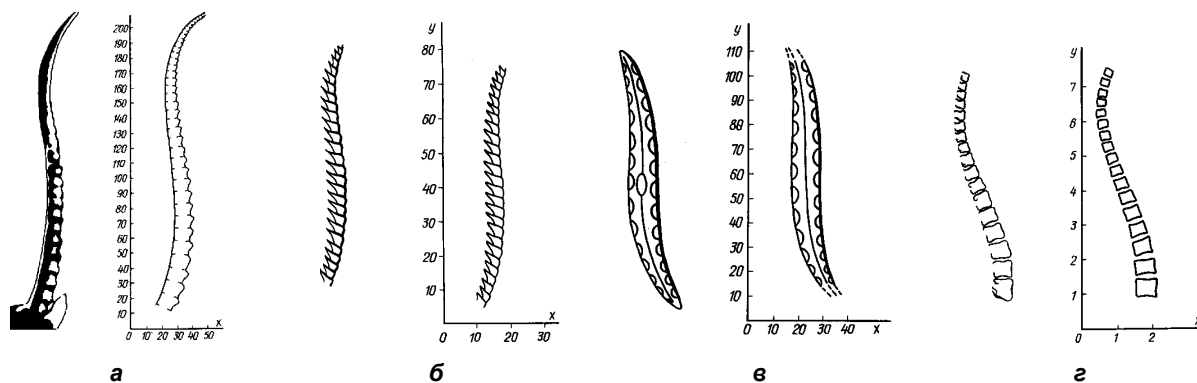
*Первичная стабилизация кейджей в междисковом пространстве должна способствовать обеспечению естественной формы позвоночника в норме. Этому условию удовлетворяют кейджи клиновидной конструкции, разработанные в Крымском государственном медицинском университете им. С.И.Георгиевского. Приведены результаты конечно-элементного анализа блоков “позвонки-кейджи-позвонки”, позволяющие оценить напряженно-деформированное состояние элементов блоков. Исследованы блоки с кейджами, имеющими различные углы клиновидности, изменяющиеся от 0° до 8°. В результате анализа намечены пути совершенствования конструкций кейджей.*

### Введение

Как известно, позвоночник человека имеет искривленную форму, причем позвонки шейного отдела повернуты кзади (кифоз), а позвонки поясничного отдела – кпереди (лордоз). Дать исчерпывающее объяснение этому факту только с позиций биомеханики не представляется возможным. Если принять точку зрения сотрудников отдела биомеханики Института машиноведения им. А.А. Благонравова (г. Москва), в котором, начиная с 70-х годов прошлого века, проводятся фундаментальные исследования инвариантно-групповых свойств живых организмов, можно считать, что такая форма есть не только результат приспособленности организма к выполнению жизнен-

но важных функций, как это трактуется большинством механиков, но и результат процесса морфогенеза.

В 1981 году была опубликована монография С.В.Петухова (сотрудника отдела биомеханики) [1], сразу ставшая бестселлером. В ней автор последовательно отстаивает идею, состоящую в том, что многим органам живых существ, включая человека, свойственны свойства симметрии, в том числе и в ее неевклидовых формах. В частности, форма позвоночника человека соответствует мебиусовой симметрии т.н. локсодромического типа. Этот вид симметрии достаточно часто встречается в живой природе. Некоторые примеры, взятые из брошюры [2], приведены на рис. 1.



**Рисунок 1. Иллюстрации органов живых существ (слева) и их мебиусовы цикломерии подобию (справа):**  
а) сегментированный рог оронго *Pantholops hodgsoni*; б) гребенчатая антенна насекомого;  
в) раковина камерника; г) позвоночник человека

Согласно точке зрения С.В. Мейена, Б.С. Соколова и Ю.А. Шрейдера [3] “биологические структуры лишь в частных случаях определяются выполняемыми функциями, а в общем случае подчиняются некоторым математическим законам гармонии. В многообразии форм есть своя независимая от функции упорядоченность, своя закономерная система, обнаруживаемая, например, в процессе выявления симметрий на основе строгого математического описания”.

Несмотря на сказанное, следует все-таки предполагать, что форма позвоночника в норме в основном, оптимальна с точки зрения выполнения требуемых функций.

Вне зависимости от разных точек зрения при замещении межпозвоночных дисков кейджами вполне естественными представляются требования, позволяющие обеспечить исходную или необходимую для устранения патологий скорректированную форму позвоночника.

### Принятая модель исследования

Среди известных конструкций, обеспечению требуемого угла лордоза при фиксации позвонков поясничного отдела способствуют клиновидные титановые кейджи, конструкции которых разработаны в Крымском государственном медицинском университете им. С.И. Георгиевского. Одна из таких конструкций представлена на рис. 2.

Для моделирования взаимодействия кейджей с позвонками использована компьютерная программа Cosmos DesignSTAR 3, широко используемая при решении подобных задач за рубежом и в последнее время в Украине. Конечнo-элементная модель объекта исследования (рис. 3) представлялась в виде блоков типа “позвонок-кейдж-позвонок”. При этом нагрузка прикладывалась к поверхностям верхнего позвонка, а основание нижнего позвонка считалось жестко заземленным. Такой подход, например, использован в [4], где вертикальная нагрузка, действующая на позвонок принята равной 1760 Н, а горизонтальная (сдвиговая) – 370 Н.

Отметим, что во многих источниках при исследовании напряженно-деформированного состояния подобных блоков приняты другие варианты нагружения, значительно отличающиеся друг от друга. Так в [5] принята осевая нагрузка 400 Н, действующая совместно с изгибающим моментом величиной 4.5 Нм. Ряд исследователей (Patwardhan et al. Spine. 1999. №24. P. 1003-1009; Rohlman et al. Spine. 2001. №24. P. E557-E561) важным фактором считают способ-

ность позвонков в норме поворачиваться друг по отношению к другу на некоторые углы. По данным приведенных выше источников вращательные движения совершаются под действием приложенных к ним моментов величиной порядка 7,5 Нм относительно трех осей декартовой системы координат. В [6] описан эксперимент с переменной аксиальной силой (50–450)Н без учета действия моментных нагрузок, то есть в каждом конкретном случае при исследовании определенного процесса или зависимости некоторых параметров исследователями принимаются во внимание такие нагрузки и их величины, которые, с их точки зрения, наилучшим образом способствуют получению оптимального результата, причем эти нагрузки обязательно должны соответствовать некоторым усредненным биомеханическим особенностям объекта исследования. В некоторых случаях численные значения нагрузок могут быть средними, в некоторых - экстремальными или даже в несколько раз превышать их.

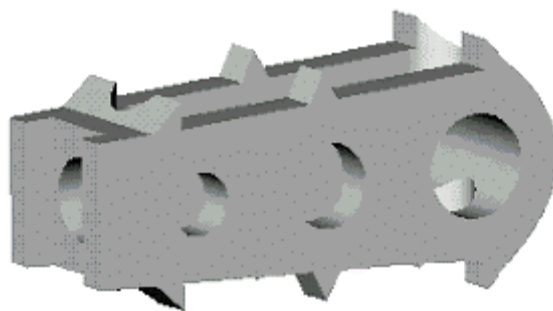


Рисунок 2. Клиновидный кейдж с углом клина 4° (высота зубьев 1,5 мм)

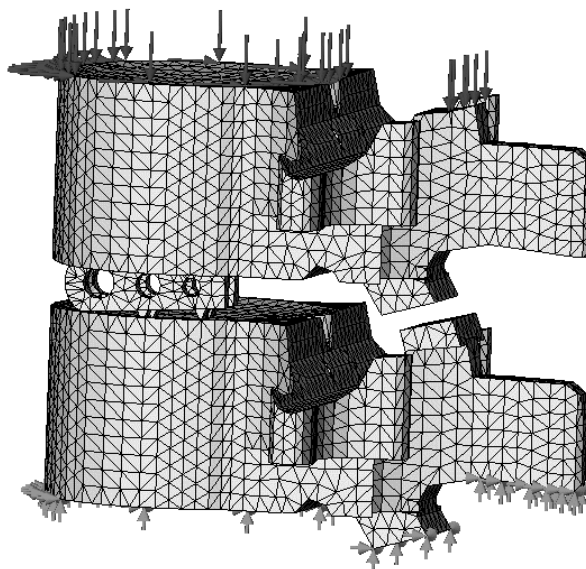


Рисунок 3. Конечнo-элементная модель блока “позвонок-кейдж-позвонок”

В данной задаче существенными являются осевая сжимающая нагрузка, действующая в вертикальном направлении и моментная нагрузка, действующая относительно оси перпендикулярной продольной оси кейджа и лежащей в горизонтальной плоскости, которая может приводить к миграции кейджа в передне-заднем направлении, а также к ротации позвонков. Моментная нагрузка может быть заменена статически эквивалентной, определяемой как момент равнодействующей распределенной нагрузки, приложенной к поверхности позвонка в направлении оси кейджа относительно соответствующей оси проходящей через нижнюю опорную поверхность позвонка. Принятая комплексная нагрузка, стремящаяся сжать и сдвинуть позвонки друг относительно друга, имеет следующие значения:

$p_x = 190 \text{ кН/м}^2$  – распределенная по поверхности позвонка нагрузка направленная вдоль продольной оси кейджа;

$F_{y1} = 1000 \text{ Н}$  – осевая нагрузка, приложенная к поверхности позвонка в вертикальном направлении;

$F_{y2} = 2500 \text{ Н}$  – осевая нагрузка, приложенная к позвонковому отростку в вертикальном направлении.

Механические свойства материала позвонков (кортикальная кость) приняты в виде усредненных величин, исходя из анализа литературных источников:

Модуль Юнга

$$E_k = 1,776 \cdot 10^{10} \text{ МПа},$$

Коэффициент Пуассона

$$\mu_k = 0,29,$$

Предел прочности

$$\sigma_{Bk} = 63,2 \text{ МПа}$$

Механические свойства материала кейджа (ВТ1-0) соответствуют справочным значениям. При исследовании приняты изотропные модели

### Литература

1. Петухов С.В. Биомеханика, бионика и симметрия. – М.: Наука, 1981. – 239 с.
2. Петухов С.В. Геометрия живой природы и алгоритмы самоорганизации / Новое в жизни, науке, технике: Сер. «Математика, кибернетика». – М.: Знание, 1988. – №6. 48 с.
3. Мейен С.В., Соколов Б.С., Шрейдер Ю.А. Классическая и неклассическая биология: феномен Любищева // Вестн. АН СССР. – 1977. – №10. – С.112 – 124.
4. White III A.A., Panjabi M.M. Clinical biomechanics of

материалов, задача решалась в линейной постановке.

### Результаты исследования и выводы

В системе Cosmos DesignSTAR 3 моделировался процесс первичной стабилизации клиновидных кейджей при действии заданной нагрузки. В результате получены картины распределения и численные значения напряжений, деформаций и перемещений в узлах сетки конечных элементов. Исследовались модели блоков с кейджами, имеющими углы клина от 0 до 8° с шагом 1°. Установлено, что величина угла клина существенно влияет на перераспределение напряжений и деформаций между элементами блока.

Деформационные картины элементов блока изменяются при изменении моделей нагружения и закрепления. Кроме этого, их изменения возможны при более точном моделировании формы позвонков, а также при различных случаях расположения кейджа на поверхности позвонка.

Подробный анализ численных значений напряжений, деформаций и перемещений в узлах сетки конечных элементов модели позволил сделать следующие выводы:

- 1) угол клина кейджа оказывает существенное влияние на перераспределение напряжений и деформаций как в кейдже, так и в позвонках;
- 2) существует некоторый оптимальный угол соответствующий определенной величине нагрузки и характеру ее распределения (для исследованной модели с заданными параметрами такой угол близок к 4°). Можно предположить, что оптимальный угол клина может быть рассчитан для каждой пары позвонков с учетом их состояния на момент операции;
- 3) клиновидные кейджи позволяют производить качественное восстановление функций позвоночника, обеспечивая его требуемую форму.

the spine. Second edition. – Philadelphia: J.B. Lippincott company, 1990. – 772 p.

5. Abumi K., Panjabi M., Duranceau J. Biomechanical evaluation of spine fixation devices, Part 3, stability provided by 6 spinal fixation devices and interbody bone graft // Spine. – 1989. – Vol. 14. – P. 1249-1255.

6. Berlemann U., Ferguson S.J., Nolte L.-P. and Heini P.F. Adjacent Vertebral Failure following vertebroplasty: A Biomechanical Investigation / Basic and Clinical Biomechanics (www.cranium.unibe.ch)

### Контактная информация:

Поляков Александр Михайлович

г. Севастополь, тел. (0692) 42-99-39, 8-050-398-27-69

E-mail: polyakov@sevcom.net