

УДК 616.711-001.5-053.2-083:615.477.32

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОРРЕГИРУЮЩЕГО КОРСЕТА НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ДЕФЕКТНОГО ПОЗВОНКА

<sup>1</sup>Виссарионов С.В., <sup>2</sup>Павлов И.В., <sup>1</sup>Кокушин Д.Н.

<sup>1</sup>ФГБУ НИДОИ им. Г.И. Турнера Минздрава России, Санкт-Петербург, e-mail: turner01@mail.ru;

<sup>2</sup>ФГБУ СПб НЦЭПР им. Г.А. Альбрехта, Санкт-Петербург

Представлена математическая модель взаимодействия гиперэкстензионного корсета и поврежденного позвонка при компрессионном переломе. Выполнен расчет напряженно-деформированного состояния позвонков методом конечных элементов с помощью программы Femap 10.0. Выявлено, что рассмотренная в модели система сил, обеспечивает полную разгрузку поврежденного позвонка.

**Ключевые слова:** компрессионный перелом позвонка, модель, здоровые позвонки, дефектный позвонок, корсет, система сил

## MODELING OF THE EFFECT OF CORRECTIVE CORSET ON THE STRESS-STRAIN STATE OF A DEFECTIVE VERTEBRA

<sup>1</sup>Vissarionov S.V., <sup>2</sup>Pavlov I.V., <sup>1</sup>Kokushin D.N.

<sup>1</sup>Federal State Budget Institution «The Turner Scientific and Research Institute»  
under the Ministry of Health of Russia, St. Petersburg, e-mail: turner01@mail.ru;

<sup>2</sup>Federal State Institution St. Petersburg Scientific and Practical Centre of Medical and Social Expertise,  
Prosthetics and Rehabilitation named after G.A. Albrecht, St. Petersburg

A mathematical model of interaction of hyper extension corset and damaged vertebra after compression fracture is presented. The calculation of stress-strain state of the vertebrae by finite element method using Femap 10.0 was carried out. It was revealed that system of forces considered in the model provides a complete unloading of a damaged vertebra.

**Keywords:** compression vertebral fracture, a model, healthy vertebrae, defective vertebra, corset, the system of forces

Переломы позвонков у детей остаются одной из актуальных проблем травматологии детского возраста. Компрессионные переломы тел позвонков до настоящего времени остаются серьезной социальной проблемой для общества в целом, связанной с необходимостью длительного, а, следовательно, дорогостоящего лечения пациента, сопровождающегося продолжительным периодом медицинской и социальной реабилитации. По данным литературы, травма позвоночника у детей среди всех поврежденных опорно-двигательного аппарата встречается от 0,65% до 9,47% [6].

Консервативное лечение, основанное на классических методах, предусматривающих функциональное вытяжение и формирование полноценного «мышечного корсета» спины, по данным ряда исследователей, приводит к неудовлетворительным результатам в 40,6% – 45,0% наблюдений. Это проявляется поздними хроническими вертеброгенными болями и ранним развитием дегенеративно-дистрофических процессов в позвоночнике [7, 9]. На наш взгляд, основными принципами лечения детей с компрессионными переломами позвонков должны являться – разгрузка поврежденного позво-

ночно-двигательного сегмента, адекватная его фиксация, максимально быстрое и эффективное восстановление анатомических взаимоотношений в травмированном отделе позвоночника, а также ранняя активизация пациента. Эти цели можно достичь, прибегнув к лечению больного с подобной травмой позвоночника гиперэкстензионным корсетом. В литературе встречаются единичные исследования, посвященные раннему ортезированию детей с компрессионными переломами позвонков [1].

### Цель исследования

Разработка математической модели гиперэкстензионного корсета, доказывающая, что его применение у пациентов с компрессионным переломом тел позвонков способно обеспечить необходимую разгрузку поврежденного сегмента позвоночника, создать условия для консолидации и восстановления его формы.

### Материалы и методы исследования

Для оценки влияния корригирующего гиперэкстензионного корсета на напряженно-деформированное состояние дефектного позвонка были рассмотрены две модели участка грудного отдела по-

звоночника. Расчет напряженно-деформированного состояния позвонков проводили методом конечных элементов с помощью программы Femap 10.0 [2, 3, 4, 8, 10]. В одной модели (неповрежденный позвоночник) здоровые позвонки условно представлены короткими цилиндрами диаметром 50 мм. и высотой 20 мм, общее количество позвонков составляло 10. Вторая модель включала поврежденный позвонок с легкой степенью компрессии со снижением высоты передней колонны до 1/3. Ниже дефектного позвонка располагались два здоровых позвонка с такими же параметрами размеров, что и у модели здорового позвоночника, и цилиндрическими дисками диаметром 50 мм. и высотой 5 мм. Выше дефектного позвонка располагались 7 здоровых позвонков. Для придания

естественной кривизны позвоночника в сагиттальной плоскости диски между верхними позвонками представлены также цилиндрами диаметром 50 мм, но с наклонной верхней плоскостью – угол наклона относительно основания диска равен 4 градусам. Таким образом, толщина дисков с одной стороны составляла 5 мм, а с другой – 8,5 мм. Поврежденный (компримированный) позвонок имел форму цилиндра диаметром 50 мм с разной высотой вдоль сагиттальной плоскости: 20 мм с одной стороны и 13,3 мм с другой. Общий вид модели здорового и травмированного позвоночника представлен на рис. 1. Поврежденный позвонок отличался от здорового только наличием компримированного позвонка с поражением передней колонны.

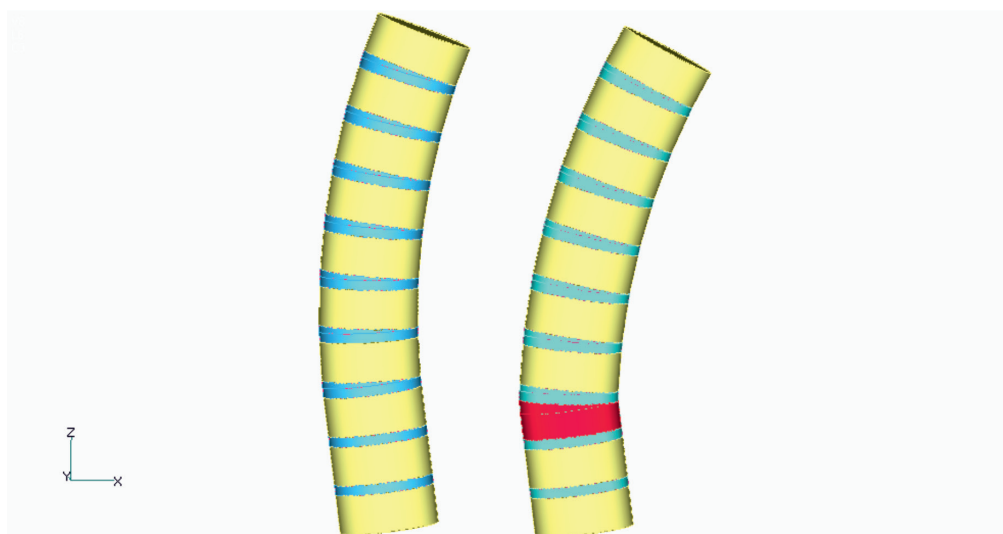


Рис. 1. Общий вид модели здорового (слева) и дефектного (справа) позвоночника. Компримированный позвонок выделен красным цветом

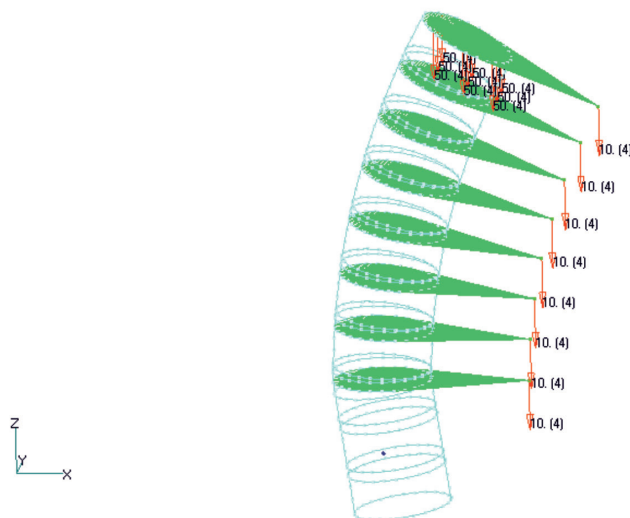


Рис. 2. Полная система сил, действующих на позвоночник

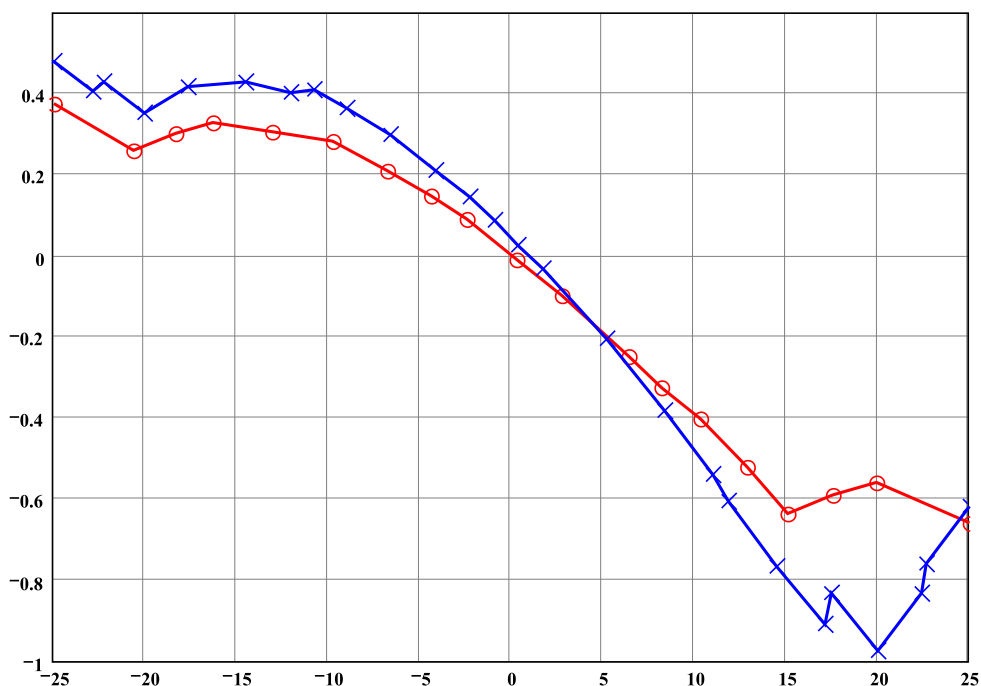


Рис. 3. Зависимость нормальных напряжений вдоль средней линии на 8-й грудной позвонок здорового (красная линия) и поврежденного (синяя линия) позвоночников

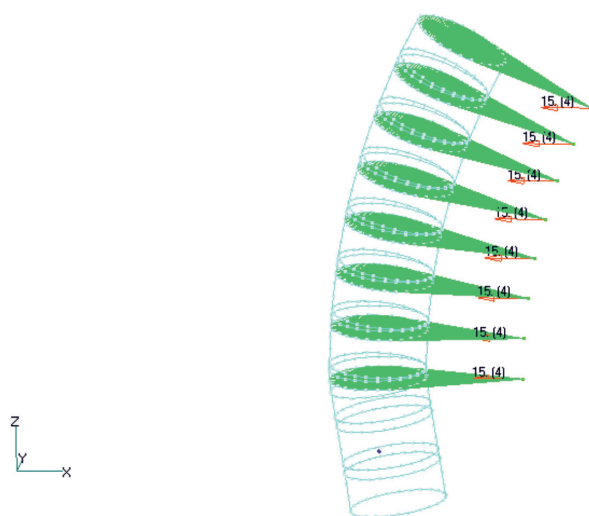


Рис. 4. Система сил, имитирующая воздействие корсета на дефектный позвоночник

Для определения влияния гиперэкстензионного корсета на состояние травмированного позвонка первоначально рассматривали действие сил тяжести на здоровый и дефектный позвоночник ребенка 12 лет [5]. С учетом этого на первый грудной позвонок действует вертикальная сила, имитирующая вес головы и шеи равная 50 Н. Сила направлена в отрицательном направлении оси Z основной системы координат. Кроме того, на позвоночник действует

сила тяжести средней части туловища. Центр масс этой части туловища несколько смещен вперед относительно позвоночника, поэтому вес средней части туловища моделировали вертикальными силами величиной 10 Н, приложенными к позвоночно-двигательному сегменту (узел модели), расположенными на расстоянии 75 мм от центра позвонка. Эти узлы жестко связаны с верхними поверхностями позвонков (рис. 2).

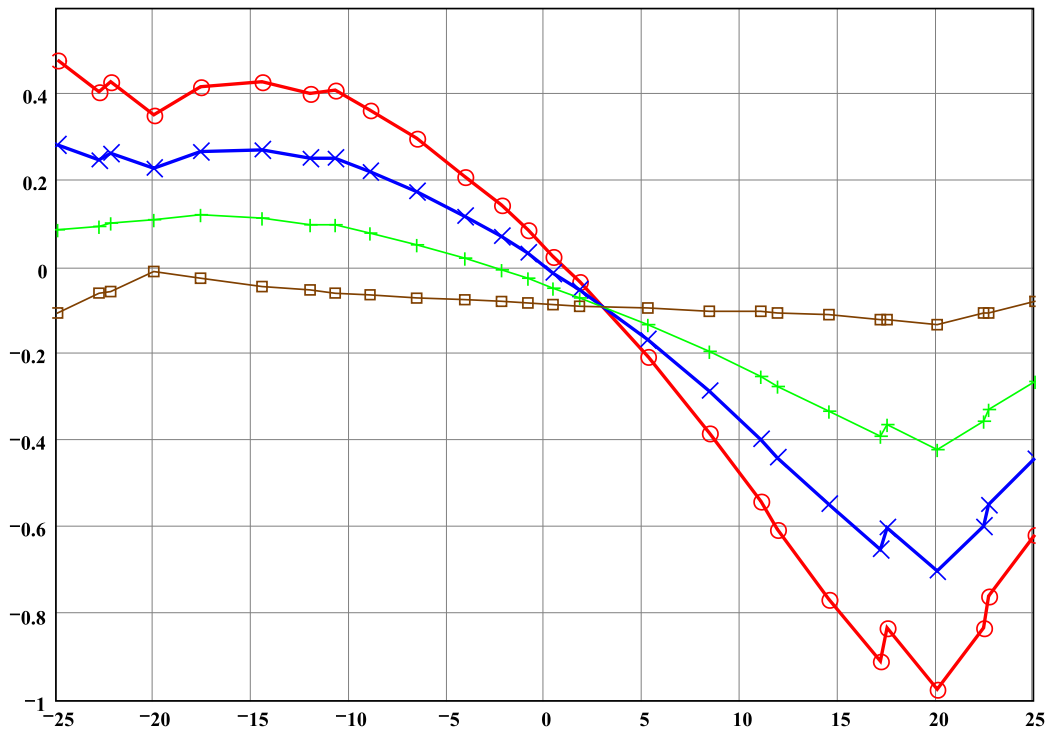


Рис. 5. Зависимость нормальных напряжений вдоль средней линии в 8-м грудном позвонке поврежденного позвоночника без восстанавливающей силы (красная линия), при восстанавливающей силе 5 Н (синяя линия), 10 Н (зеленая линия) и 15 Н (коричневая линия) на узел модели

Поскольку часть позвоночника ниже места перелома фиксируется в корсете, на нижнем позвонке модели зададим граничные условия в виде ограничения движения во всех трех направлениях. Для сравнения напряженно-деформированного состояния здорового и дефектного позвоночника рассматривали нормальные напряжения, действующие на верхнюю замыкательную пластинку 8-го грудного позвонка. Нормальные напряжения (компонента Z в основной системе координат) действуют перпендикулярно плоскости позвонка и при данной системе сил являются наибольшими по величине. Именно нормальные напряжения определяют возможность и скорость восстановления дефектного позвонка. Сжимающие напряжения условно считаются отрицательными, растягивающие – положительными. Таким образом, напряжения распределены симметрично относительно сагиттальной плоскости, и наибольшие значения напряжений имеют на линии пересечения плоскости позвонков с сагиттальной плоскостью. Более точное представление о величине напряжений дает зависимость напряжений вдоль этой линии (рис. 3).

Так как начальный изгиб дефектного позвоночника больше, чем здорового, то вес туловища вызывает большие напряжения в компримированном позвонке. Наибольшая разница наблюдается в передней части позвонков, где напряжения сжимающие.

Корректирующий корсет должен разгружать дефектный позвонок, что необходимо для его правильного восстановления. Рассмотрим, как изменяются напряжения, вызванные весом тела в дефектном позвонке, если к позвоночнику приложить силы, про-

тивоположные направлению изгиба позвоночника. При этом результирующая сила действия пелотов ортеза оказывается ориентирована в передне-заднем направлении.

На рис. 4 изображена система сил, имитирующая воздействие корсета на дефектный позвоночник. Силы так же приложены к дополнительным узлам модели, как и вес средней части туловища, но направлены в отрицательном направлении оси X основной системы координат (рис. 4). Для краткости далее эту силу будем называть «восстанавливающей».

Рассмотрим пространственные распределения нормальных напряжений в дефектном позвонке при величине восстанавливающей силы 5, 10 и 15 Н на один узел модели соответственно. С учетом представлений, изложенных ранее, отмечается, что при силе 5 Н на узел модели распределение напряжений в дефектном позвонке практически такое же, как и в 8-м грудном позвонке здорового позвоночника. С ростом восстанавливающей силы как сжимающие, так и растягивающие напряжения уменьшаются. Более точное представление о величине напряжений дает зависимость напряжений вдоль средней линии при разных значениях восстанавливающей силы. Как видно из рис. 5, при восстанавливающей силе 15 Н дефектный позвонок практически полностью разгружен.

При действии восстанавливающей силы напряженно-деформированное состояние позвонков изменяется в зависимости от их расположения. До сих пор рассматривался только дефектный позвонок в позвоночнике с переломом. При рассмотрении распределения напряжений нормальных напряжений на верхних

плоскостях дефектного и двух верхних позвонков при восстанавливающей силе 15 Н на узел модели отмечено следующая закономерность. При полной разгрузке дефектного позвонка, в верхних позвонках сохраняются сжимающие напряжения со стороны груди, причем, чем дальше позвонок от дефектного, тем выше эти напряжения. Аналогичная картина наблюдается и в нижних позвонках, но сжимающие напряжения расположены со стороны спины. Конечно, значения напряжений в дефектном позвонке – это наиболее важный фактор с точки зрения его восстановления. Однако окончательное определение оптимального для лечения значения восстанавливающей силы следует производить с учетом уровня напряжений, как в дефектном, так и в здоровых смежных позвонках.

#### Результаты исследования и их обсуждение

1) напряжения, вызванные весом тела, больше в дефектном позвонке, чем в аналогичном по расположению позвонке здорового позвоночника;

2) при действии силы, направленной против направления изгиба позвоночника, напряжения в дефектном позвоночнике уменьшаются и при значении силы 15 Н практически равны нулю, т.е. происходит его полная разгрузка;

3) эффект разгрузки при этом имеет локальный характер – соседние с дефектным позвонки при силе 15 Н сохраняют напряжения, которые тем больше, чем дальше расположены позвонки от дефектного позвонка;

4) окончательный выбор оптимального для лечения значения восстанавливающей силы следует делать на основе напряженно-деформированного состояния как дефект-

ного (в первую очередь), так и соседних здоровых позвонков позвоночника.

#### Заключение

Представленная математическая модель взаимодействия поврежденного позвоночника и ортеза объясняет его воздействие на поврежденный позвонок и подтверждает его возможность применения в клинической практике.

#### Список литературы

1. Виссарионов С.В., Павлов И.В., Гусев М.Г., Леин Г.А. Комплексное лечение пациента с множественными переломами позвонков в грудном отделе позвоночника. Травматология и ортопедия России. – 2012. – № 2(64). – С. 91–95.
2. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы: Пер. с англ. – М.: Мир, 1984.
3. Деклу Ж. Метод конечных элементов: Пер. с франц. – М.: Мир, 1976.
4. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике – М.: Мир, 1975.
5. Мазурин А.В., Воронцов И.М. Пропедевтика детских болезней Медицина, 2000. – 672 с.
6. Макаревич С.В., Грищенко Л.Н., Мухля А.М. и др. Повреждения позвоночника у детей // Повреждения и заболевания позвоночника и суставов: Мат. науч. практ. конф. травм.-орт. Республики Беларусь. – Минск, 1998. – С. 189–193.
7. Молчанов В.И. Диагностика, лечение и реабилитация больных с травмой позвоночника и спинного мозга: Автореф. дис. ... докт. мед. наук. – Л., 1990. – 41 с.
8. Мяченков В.И., Мальцев В.П., Майборода В.П. и др. Расчеты машиностроительных конструкций методом конечных элементов // Справочник. – М.: Машиностроение, 1989.
9. Раднаев Э.Б. Хирургическое лечение неосложненных переломов нижнегрудного и поясничного отделов позвоночника с использованием дорсальных фиксаторов // Автореф. дис. ... канд. мед. наук. – Л., 2004. – 128 с.
10. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов – М.: Мир, 1979. – 392 с.