

ющего реактора тяговых подстанций, которая позволяет оценить степень надежности этого устройства в аварийных режимах короткого замыкания контактной сети.

Список литературы: 1. Справочник по электроснабжению железных дорог / Т. 2 // Под ред К. Г. Маркварда. – М.: Транспорт, 1981. – 392 с. 2. Том Р., Тарр Дж. Магнитные системы МГД генераторов и термоядерных установок. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 268 с. 3. Клименко Е.Ю., Ожогова В.К. Математическое обеспечение проектирования сверхпроводящих магнитных систем для плазменных установок типа Токмак // Вопр. атомной науки и техники. – М., 1975. – С. 40-41. 4. Urankar L. Vector potential and magnetic field of current-carrying finite arc seg-Ment: In 3 parts / IEEE Trans. Mag.; Part 1: 1980. - 16. – P. 1283-1288; Part II, III: 1982. – 18. – P. 911-917; P. 1860-1867. 5. Bulirsch R. Numerical calculations of elliptic integrals and elliptic functions: In 3 parts // Numer. Math.; Part I, 1965. – 7. – P. 78-90; Part II, III, 1969. – 13. – P. 266-284; P. 305-315.

Надійшла до редколегії 16.01.13

УДК. 539.3:612.76:616.001

О.В. ВЕРЕТЕЛЬНИК, м. н. с. каф. ТММиСАПР НТУ „ХПИ“;
А.Е. БАРЫШ, д.м.н., засл. деят. науки и тех-ки Украины, г.н.с. ГУ «Ин-т патологии позвоночника и суставов им. проф. Н.И. Ситенко» АМНУ, Харьков;
И.Б. ТИМЧЕНКО, с. н. с. лаб. ортезирования и биоматериалов ГУ «Ин-т патологии позвоночника и суставов им. проф. Н.И. Ситенко» АМН Украины;
А.А. ДЫННИК, к.м.н. зав. лаб. ортезирования и биоматериалов ГУ «Ин-т патологии позвоночника и суставов им. проф. Н.И. Ситенко» АМН Украины;
А.В. ПОГОРЕЛАЯ, м. н. с. лаб. ортезирования и биоматериалов ГУ «Ин-т патологии позвоночника и суставов им. проф. Н.И. Ситенко» АМН Украины

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ШЕЙНОГО ОТДЕЛА ПОЗВОНОЧНИКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРЕХ РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ОРТЕЗОВ

В данной работе представлены результаты численных исследований напряженно-деформированного состояния шейного отдела позвоночника с применением ортезирования. В рассмотрении участвуют три различные конструкции ортезов, как по конструкциям, так и по материалу, из которых они выполнены.

Ключевые слова: шейный отдел позвоночника, ортез, напряженно-деформированное состояние

У даній роботі представлені результати чисельних досліджень напружено-деформованого стану шийного відділу хребта із застосуванням ортезування. У розгляді беруть участь три різні конструкції ортезів, як за конструкціями, так і за матеріалом, з яких вони виконані.

Ключові слова: шийний відділ хребта, ортез, напружено-деформований стан

This paper presents the results of numerical studies of the stress-strain state of the cervical spine with the use of orthotics. In consideration involves three different designs of orthosis, both the structures, and on the materials from which they are made.

© О.В. Веретельник, А.Е. Барыш, И.Б. Тимченко,
А.А. Дынник, А.В. Погорелая, 2013

Keywords: cervical spine, orthosis, the stress-strain state

Постановка задачи. В настоящее время развитие разнообразных технологий производства привели к возможности создать материалы и конструкции (эндопротезы), способные заменить поврежденный элемент или некоторый сегмент шейного отдела позвоночника (ШОП) и выполнять функции, возложенные на замененный элемент/сегмент.

Операция по замене поврежденного элемента ШОП внутренним протезом называется эндопротезированием. Современное развитие эндопротезирования является эффективным и в некоторых оперативных лечених единственным способом восстановления утраченной функции поврежденного элемента. Однако в параллель с эндопротезированием актуальным остается и внешняя иммобилизация ШОП с помощью различных ортезов, так называемое ортезирование. Изготовленный из полимерных материалов ортез является индивидуальным и максимально точно описывает анатомическую форму ШОП. Применение эндопротезирования позволяет восстановить полную функциональность пациента, а ортезирование уменьшает сроки пребывания в стационаре и способствует более быстрой реабилитации пациента [1-13].

Однако в литературе, посвященной численным исследованиям механического поведения ШОП с применением эндопротезирования и ортезирования, мало встречается соответствующих тематических публикаций, и поэтому все еще так актуально проводить соответствующие исследования, в том числе экспериментальные и численные.

Данная публикация открывает новый цикл исследований, посвященных рассмотрению напряженно-деформированного состояния (НДС) ШОП с совместным и раздельным применением ортезирования и протезирования. Таким образом, в дальнейших публикациях будут представлены результаты моделирования, расчетов НДС различных конструкций ортезов и эндопротезов, а также элементов ШОП. Один из первых этапов данного исследования – исследование двух конструкций ортезов, без эндопротезов.

В данной работе будут представлены результаты моделирования ШОП с различными конструкциями ортезов: разработанного в ГУ «Институт патологии позвоночника и суставов им. проф. М. И. Ситенко НАМН Украины», известного Philadelphia Cervical Collar, а также еще одного ортеза воротничкового типа (конструкции 1, 2 и 3 соответственно).

Ранее ортезы 1-й и 3-й конструкций уже рассматривались. Однако 1-я конструкция получила дальнейшее развитие и применение, и было принято решение о повторном его исследовании в сравнении с широко применяемым ортезом 3-й конструкции и известным зарубежным аналогом – 2-я конструкция. Ортезы 1-й и 2-й конструкций выполнены из пенополиэтилена, 3-й – из поролонa. Однако в конструкциях пенополиэтиленовых ортезов имеются существенные отличия: в конструкции 1 имеются боковые отверстия для вентиляции и доступа к горлу, а также с фронтальной стороны имеется усиление в виде пластины, изготовленной из винипласта. В конструкции 2 также присутствуют две накладкИ, одна с фронтальной стороны, вторая с затылочной сто-

роны. Обе накладки являются усилениями, которые не дают развиваться наклону головы в сагиттальной плоскости. Во фронтальной накладке имеется центральное отверстие для быстрого доступа к горлу и трахее. Поролоновый ортез имеет цельную конструкцию.

Ортезы 1-й и 3-й конструкции представляют собой цельные конструкции с разрывом с тыльной стороны с текстильной застежкой («липучка»), а 2-й представляет собой конструкцию, состоящую из двух частей, разделенных в поперечной плоскости, и при этом текстильная застежка находится по бокам



Конструкция 1



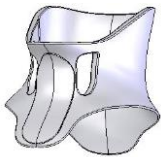
Конструкция 2



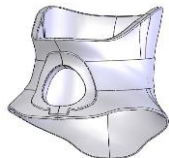
Конструкция 3

Рисунок 1. Различные конструкции ортезов

различные конструкции ортезов, построены на базе ранее созданной модели [2]. Ранее созданная модель описывает ШОП: позвонки $C_1 - C_{VII}$, которые были построены с учетом внешнего строения и формы, опора – часть предплечья, включающая ребра и лопатку. Обе используемые модели, описывающие ШОП с ортезом, отличаются только конструкциями ортезов.



конструкция 1



конструкция 2



конструкция 3

Рисунок 2 – Восстановленные геометрии ортезов

элементов в конструкциях ортезов. Так, в ортезах 1-й и 3-й конструкций были упразднены текстильные застежки, так как они имели только практическую составляющую при использовании самих ортезов. В модели 2-й конструкции была промоделирована текстильная застежка в виде ленты, так как она окольцовывает весь ортез по всему периметру и усиливает всю конструкцию в целом. Также в модели зарубежного ортеза разделение на две составляющие были заменены одной целой, но с центральной вертикальной центральной по-

ортеза, с креплением краев к усиливающим пластинам. Внешний вид рассматриваемых ортезов представлен на рис. 1.

Геометрические модели, описывающие ШОП и

На рис. 2 и рис. 3 [13] представлены геометрии исследуемых моделей позвонков $C_1 - C_{VII}$ и опоры. В процессе моделирования были сделаны упрощения некоторых



Рисунок 3 – КЭМ с 1-й конструкцией ортеза

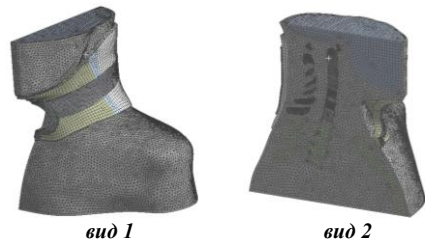


Рисунок 4 – КЭМ со 2-й конструкцией ортеза

лосой в зоне стыка, выполненной из низко модульного материала. На рис. 4 [13] представлены геометрии в сборке для ШОП с 2-мя различными конструкциями ортеза соответственно. На рис. 2 представлены восстановленные геометрические модели ортезов. Нагружение осуществлялось путем приложения силы к поверхности «головы» величиной 100 Н, сама схема нагружения, закрепления и симметрия (в сагиттальной плоскости) модели представлена в [3-12], (рис. 7 [13]). Внешний вид конечно-элементных моделей (КЭМ) с различными конструкциями ортезов представлены в двух видах на рис. 3 – 5 (модели насчитывали по 1,5 млн. элементов).

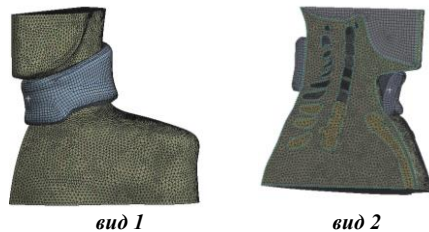


Рисунок 5 – КЭМ с 3-й конструкцией ортеза

Результаты численных исследований. По итогам проведения численных исследований получены результаты для КЭМ, описывающие ШОП и различные конструкции ортезов. Определялись максимальные эквивалентные напряжения по Mises в кортикальной и трабекулярной костях $C_{III} - C_V$ позвонков. Для всех расчетных схем проводились сравнения полученных результатов.

На рис. 6, 7 представлены диаграммы с максимальными эквивалентными напряжениями по Mises (Па) в трабекулярных и кортикальных костях для $C_{III} - C_V$ позвонков ШОП, соответственно.

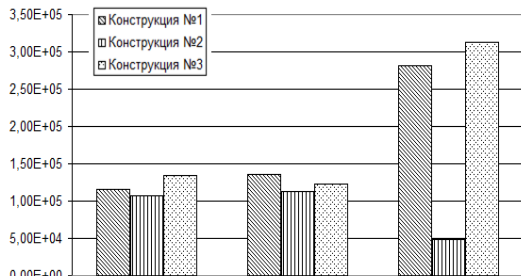


Рисунок 6 – Максимальные эквивалентные напряжения по Mises в трабекулярных костях $C_{III} - C_V$ позвонков

На рис. 8, 9 изображены диаграммы с полными перемещениями (м) и максимальные эквивалентные напряжения по Mises (Па) в ортезах соответственно. На рис. 10, 11 представлены поля распределений напряжений по Mises (Па) для шейного позвоночного сегмента $C_{III} - C_V$, включающего кортикальную и трабекулярную кости, межпозвоночные диски и хрящи, для всех схем исследования.

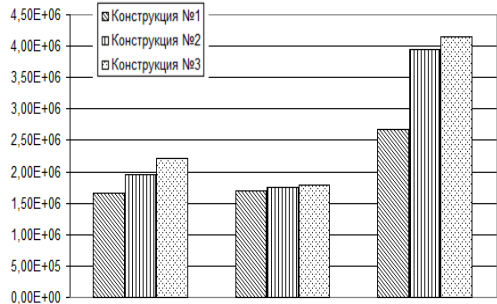


Рисунок 7 – Максимальные эквивалентные напряжения по Mises в кортикальных костях $C_{III} - C_V$ позвонков

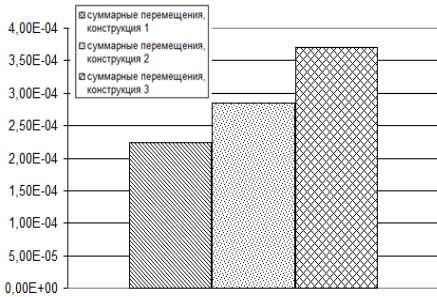


Рисунок 8 – Полные перемещения в ортезах

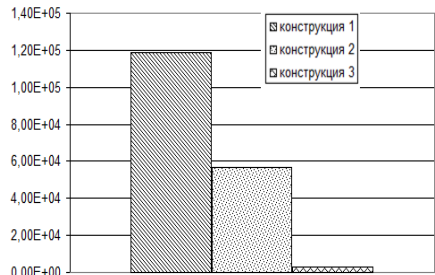


Рисунок 9 – Максимальные эквивалентные напряжения по Mises в ортезах

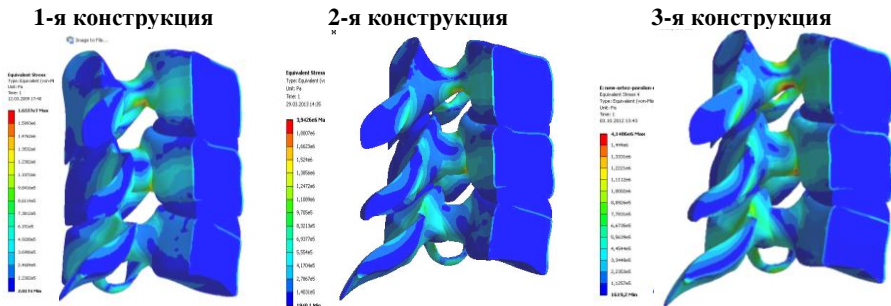


Рисунок 10 – Распределение напряжений по Mises в исследуемой геометрии с ортезами различных конструкций (вид 1)

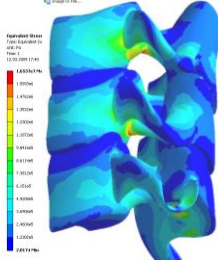
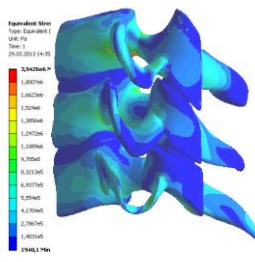
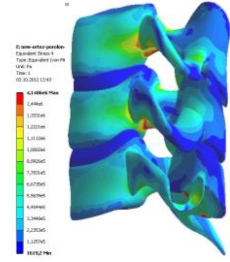
1-я конструкция**2-я конструкция****3-я конструкция**

Рисунок 11 – Распределение напряжений по Mises в исследуемой геометрии с ортезами различных конструкций (вид 2)

Заключение. Анализ полученных полей распределения компонент и характеристик НДС ШОП показал, что напряжения, возникающие в шейном сегменте $C_{III} - C_V$ ШОП с ортезом 1-й конструкции, распределяются более равномерно, напряжения для кортикальной и трабекулярной костей более низкие. При рассмотрении перемещений в ортезах наименьшие соответствуют 1-й конструкции, а наибольшие – 3-й конструкции. При рассмотрении напряжений, возникающих в ортезах, картина обратная перемещениям: максимальные соответствуют ортезу 1-й конструкции, минимальные – 3-й.

Список литературы: 1. Интернет ресурс – <http://www.senikitin.ru/orthosis/>. 2. Веретельник О.В. Исследование различных конструкций ортезов при ортезировании шейного отдела позвоночника // Вісник НТУ „ХПІ”. Тем. вип.: Машинознавство та САПР. – 2009. – №12. – С. 18-24. 3. Yoganandan N., Kumaresan S., Voo L., Pintar F. Finite element applications in human cervical spine modeling // Spine. – 1996. – Vol. 21. – № 15. – P. 1824-1834. 4. Барыш А.Е. Конечно-элементное бисегментарное моделирование позвоночных двигательных сегментов $C_{IV} - C_{VI}$ // Ортопедия, травматология и протезирование. – 2005. – №1. – С. 41-49. 5. Natarajan R.N., Chen B.H., An H.S., Andersson G.B.J. Anterior cervical fusion: a finite element model study on motion segment stability including effect of osteoporosis // Spine. – 2000. – Vol. – 25, № 8. – P. 955-961. 6. Веретельник Ю.В., Веретельник О.В., Тимченко И.Б., Дынник А.А., Соснина Ю.К. К вопросу о построении параметрических моделей шейного отдела позвоночника. // Вестник НТУ “ХПИ” Тем. вып.: Машиноведение и САПР. – 2007. – № 29. – С. 16-20. 7. Nolan J.P., Sherk H.H. Biomechanical evaluation of the extensor musculature of the cervical // Spine. – 1988. – Vol. 13. – P. 9-11. 8. Panjabi M.M., Duranceau J., Goel V. et al. Cervical human vertebrae: quantitative three-dimensional anatomy of the middle and lower regions // Spine. – 1991. – Vol.16. – №. 8. – P. 861-869. 9. Веретельник О.В. Моделирование напряжений в шейном отделе позвоночника с ортезом // Вестник НТУ “ХПИ” Тем. вып.: Машиноведение и САПР. – 2008. – № 9. – С. 22-29. 10. Веретельник О.В. Обзор конструктивных схем и решений по моделированию ШОП и ортезов // Вестник НТУ “ХПИ” Тем. вып.: Машиноведение и САПР. – 2008. – № 42. – С. 3-8. 11. Heitzplatz P., Hartle S.L., Gentle C.R. A 3-dimensional large deformation FEA of a ligamentous C4-C7 spine unit // Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering-2, – Gordon and Breach Science, UK, 1998. – P. 387-394. 12. Веретельник О.В. Моделирование реакций на силовое воздействие элемента шейного отдела позвоночника. // Вестник НТУ “ХПИ” Тем. вып.: Машиноведение и САПР. – 2008. – № 2. – С. 14-26. 13. Веретельник О.В., Ткачук Н.А., Барыш А.Е. и др. Анализ напряженно-деформированного состояния шейного отдела позвоночника при ортезировании различными видами ортезов. // Вестник НТУ “ХПИ” Тем. вып.: Машиноведение и САПР – 2013. – № 1. – С. 14-22.

Надійшла до редколегії 08.04.13