

О.В. ВЕРЕТЕЛЬНИК, мл. науч. сотр. каф. ТММиСАПР НТУ „ХПИ“;
Н.А. ТКАЧУК, д. т. н., проф., зав. каф. ТММиСАПР НТУ „ХПИ“;
А.Е. БАРЫШ, д. м. н., вед. науч. сотр. Ин-та патологии позвоночника и суставов им. проф. Ситенко АМН Украины, Харьков;
И.Б. ТИМЧЕНКО, ст. науч. сотр. лаб. ортезирования и биоматериалов Ин-та патологии позвоночника и суставов им. проф. Ситенко АМН Украины;
А.А. ДЫННИК, к.м.н. лаб. ортезирования и биоматериалов ин-та патологии и суставов им. проф. Ситенко АМН Украины, Харьков;
А.В. ПОГОРЕЛАЯ, мл. науч. сотр. лаб. ортезирования и биоматериалов ин-та патологии и суставов им. проф. Ситенко АМН Украины, Харьков

АНАЛИЗ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ШЕЙНОГО ОТДЕЛА ПОЗВОНОЧНИКА ПРИ ОРТЕЗИРОВАНИИ РАЗЛИЧНЫМИ ВИДАМИ ОРТЕЗОВ

У даній роботі представлені результати числових досліджень механічної поведінки шийного відділу хребта із застосуванням ортезування. У розгляді беруть участь п'ять різних типів конструкцій ортезів, як за зовнішньою формою, так і за матеріалом, з яких вони виконані.

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

В данной работе представлены результаты численных исследований механического поведения шейного отдела позвоночника с применением ортезирования. В рассмотрении участвуют пять различных типов конструкции ортезов, как по внешней форме, так и по материалу, из которых они выполнены.

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

This paper presents the results of numerical studies of the mechanical behaviour of the cervical spine with the use of orthosis. Participate in the examination of five different types of orthosis construction as the outer form, and on the materials from which they are made.

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

Введение. Современное развитие производства полимерных материалов позволило совершенствовать процесс изготовления ортопедических средств фиксации – ортезов. Изготовление из полимерных материалов позволяет получить ортезы в кратчайшие сроки. При этом полученный ортез является индивидуальным и максимально описывает анатомическую форму шейного отдела позвоночника (ШОП). Применяемый такой ортез ускоряет реабилитацию и сокращает сроки пребывания пациентов в стационаре [1]. Применение различных полимеров в изготовлении ортезов приводит к появлению новых конструкций, что соответственно требует приведения численных исследований и анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) [1-14].

Данная работа посвящена исследованию ШОП с различными конструкциями ортезов [2, 3].

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

Постановка задачи. На рис. 1 представлены исследуемые конструкции ортезов. Первые три конструкции изготовлены из пенополиэтилена. Вторая конструкция ортеза имеет измененную форму относительно первого варианта, к которой добавлена усиливающая пластина, изготовленная из винипласта, а внешняя форма третьей конструкции ортеза представляет собой ту же форму, как и во втором варианте, но только с добавлением боковых отверстий. Конструкция, представленная под номером 4, внешне практически неотличима от конструкции 1, однако этот ортез выполнен из более жесткого материала – поливика, и имеет меньшую толщину. Конструкция 5 представляет собой воротник, изготовленный из поролона.



Рис. 1 – Различные конструкции ортезов

Модель, описывающая новую конструкцию ортеза, построена на базе ранее созданной модели [2, 3], описывающей ШОП: позвонки $C_1 - C_{VII}$, которые были построены с учетом внешнего строения и формы, опоры – часть предплечья, включающая ребра и лопатку. Все используемые модели, описывающие ШОП с ортезом, различаются только конструкциями ортезов.

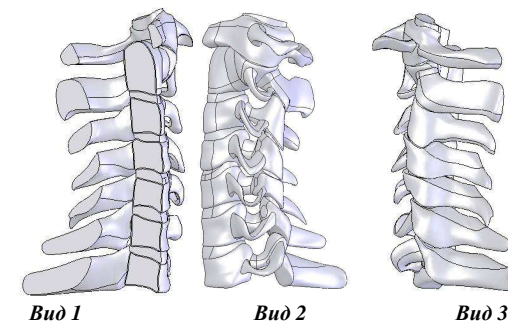


Рис. 2 – Геометрия $C_1 - C_{VII}$ позвонков

На рис. 2 и рис. 3 представлены геометрии исследуемых моделей позвонков $C_1 - C_{VII}$ и опоры. На рис. 4 и рис. 5 представлены геометрии в сборке для ШОП с 5-ю различными конструкциями ортеза и ШОП без ортеза, соответственно. На рис. 6 представлены восстановленные геометрические модели ортезов различных конструкций.

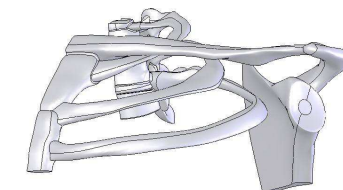
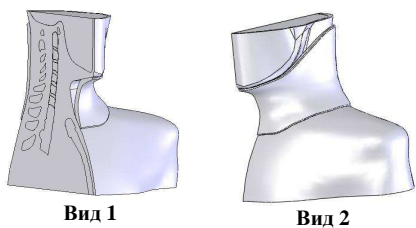
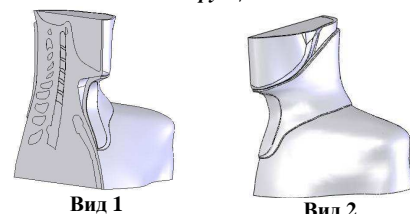


Рис. 3 – Геометрия опоры



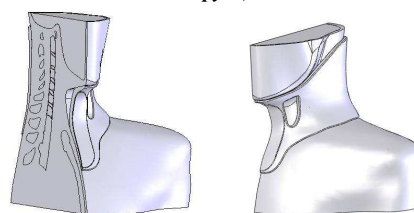
Вид 1 Вид 2

Конструкция 1



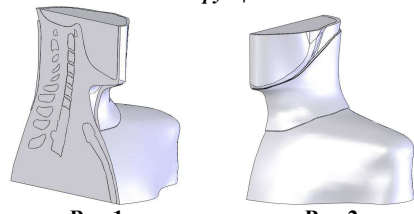
Вид 1 Вид 2

Конструкция 2



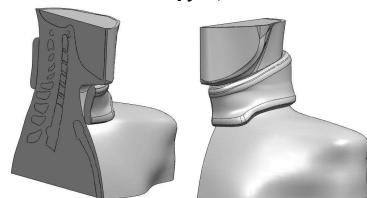
Вид 1 Вид 2

Конструкция 3



Вид 1 Вид 2

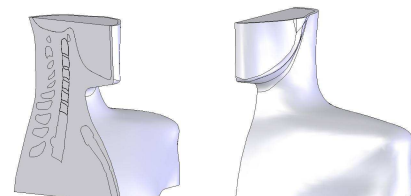
Конструкция 4



Вид 1 Вид 2

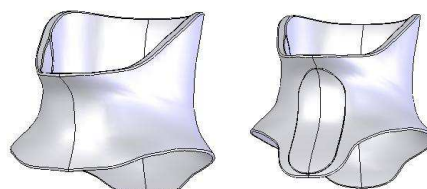
Конструкция 5

Рис. 4 – Геометрии сборок



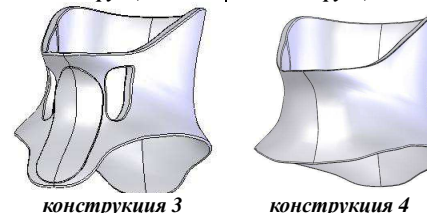
Вид 1 Вид 2

Рис. 5 – Геометрия модели без ортеза



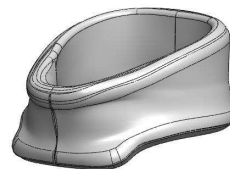
Конструкция 1

Конструкция 2



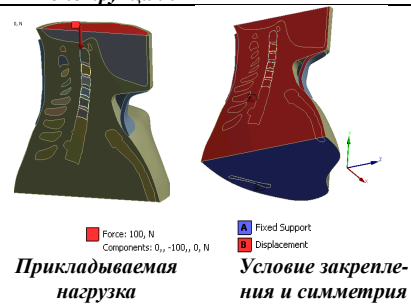
конструкция 3

конструкция 4



Конструкция 5

Рис. 6 – Восстановленные геометрии ортезов



Прикладываемая нагрузка

Условие закрепления и симметрия

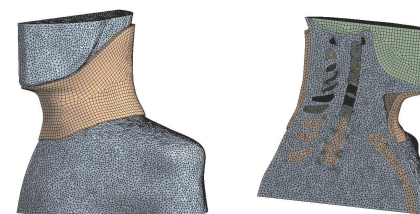
Рис. 7 – Схема нагружения и закрепления модели

В табл. 1 представлены физические характеристики материалов, используемые при моделировании процесса ортезирования. Нагружение осуществлялось путем приложения силы к поверхности «головы» величиной 100 Н, сама схема нагружения, закрепления и симметрия (в сагиттальной плоскости) модели представлена на рис. 7 [5-14].

Внешний вид конечно-элементных моделей (КЭМ) с различными конструкциями ортезов представлены в двух видах на рис. 8-12. При этом модели насчитывали по 1,5 млн. элементов.

Таблица 1 – Физические характеристики материалов

Материал	E, МПа	ν
Кортикальная кость	10 000	0,3
Губчатая кость	450	0,2
Суставной Диск	10,6	0,49
Диск	4,2	0,45
Мягкие ткани	10	0,45
Пенополиэтилен	12	0,45
Винипласт	40	0,45
Поливик	70	0,4
Поролон	0,177	0,33



вид 1

вид 2

Рис. 8 – КЭМ с 1 конструкцией ортеза



вид 1

вид 2

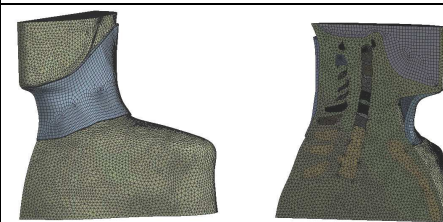
Рис. 9 – КЭМ со 2 конструкцией ортеза



вид 1

вид 2

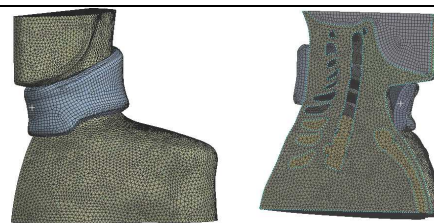
Рис. 10 – КЭМ с 3 конструкцией ортеза



вид 1

вид 2

Рис. 11 – КЭМ с 4 конструкцией ортеза



вид 1

вид 2

Рис. 12 – КЭМ с 5 конструкцией ортеза

Результаты численных исследований. По итогам проведения численных исследований, описанных выше, получены результаты для пяти вариантов расчетов. Первый расчет представлял собой исследование напряженно-деформированного состояния модели ШОП без ортеза, последующие четыре расчета – с различны-

ми конструкциями ортеза. Определялись максимальные эквивалентные напряжения по Mises в межпозвоночных дисках, кортикальной и трабекулярной костях $C_{III} - C_V$ позвонков. Для всех расчетных схем проводились сравнения полученных результатов.

На рис. 13 представлены максимальные эквивалентные напряжения по Mises (Па) в межпозвоночных дисках $D_{II-III} - D_{VI-VII}$ для всех расчетов. На представленных рис. 14 и рис. 15 изображены максимальные эквивалентные напряжения по Mises (Па) в трабекулярных и кортикальных костях для $C_{III} - C_V$ позвонков шейного отдела позвоночника, соответственно.

На рис. 16 представлены максимальные эквивалентные напряжения по Mises (Па) в ортезах для всех вариантов конструкции, а на рис. 17 представлены максимальные полные перемещения в ортезах (м).

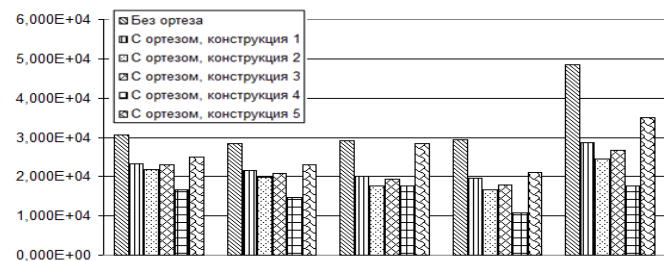


Рис. 13 – Максимальные эквивалентные напряжения по Mises в межпозвоночных дисках

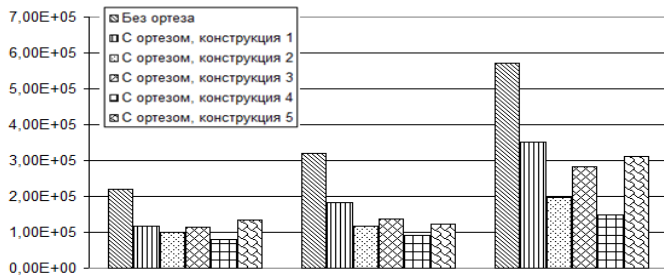


Рис. 14 – Максимальные эквивалентные напряжения по Mises в трабекулярных костях $C_{III} - C_V$ позвонков

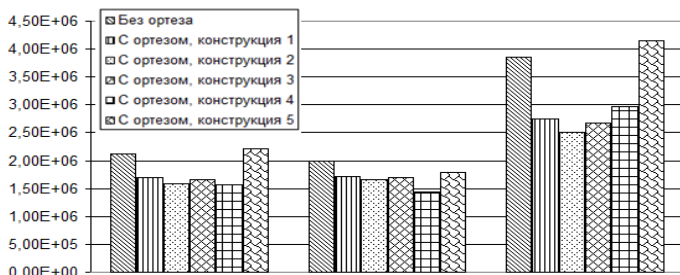


Рис. 15 – Максимальные эквивалентные напряжения по Mises в кортикальных костях $C_{III} - C_V$ позвонков

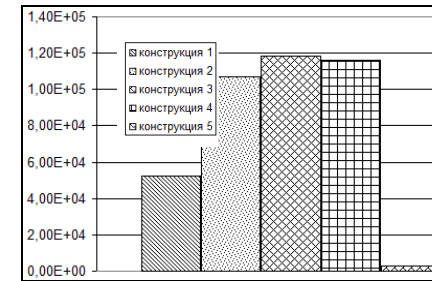


Рис. 16 – Максимальные эквивалентные напряжения по Mises в ортезах

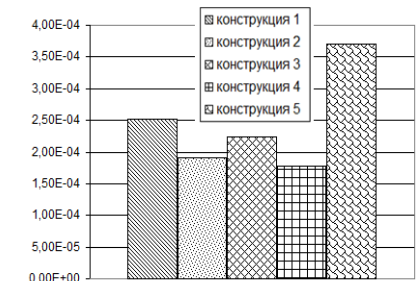


Рис. 17 – Максимальные полные перемещения в ортезах

На рис. 18 - 23 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.

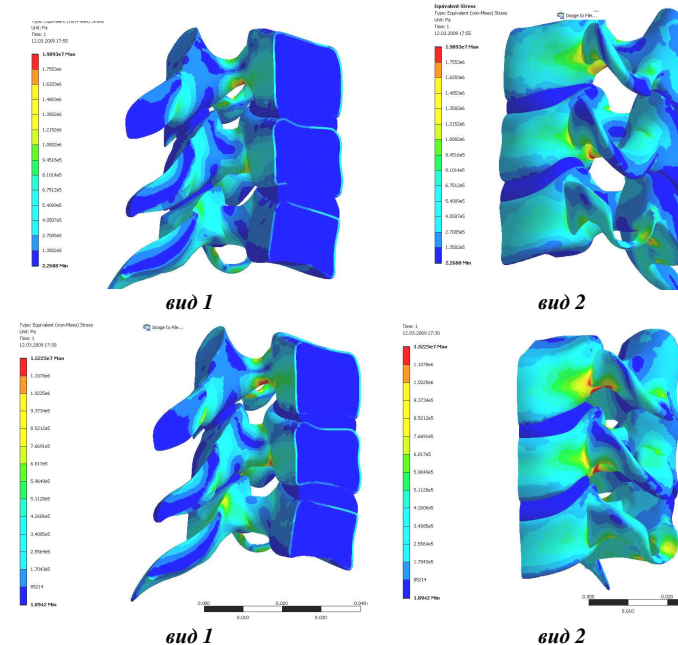


Рис. 18 – Распределение напряжений по Mises в исследуемой области геометрии без ортеза

Рис. 19 – Распределение напряжений по Mises в исследуемой области геометрии с ортезом 1-й конструкции

Анализ НДС численных исследований человеческого ШОП показал, что максимальные напряжения по Mises в межпозвоночных дисках составляют $0,03 \text{ МПа}$; в кортикальной кости равны $3,8 \text{ МПа}$, в трабекулярной кости – $0,5 \text{ МПа}$. Анализ уровня напряженности ШОП позволяет говорить о сопоставимости с данными в доступных публикациях [4].

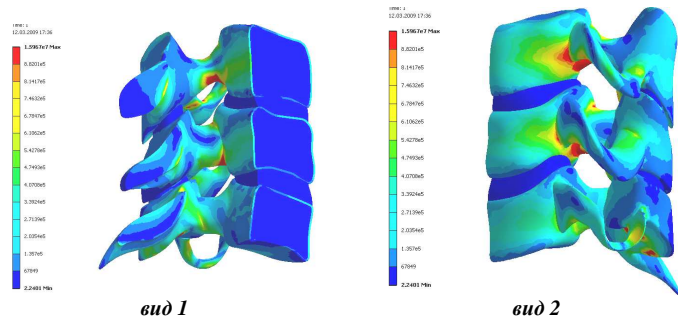


Рис. 20 – Распределение напряжений по Mises в исследуемой области геометрии с ортезом 2-й конструкции

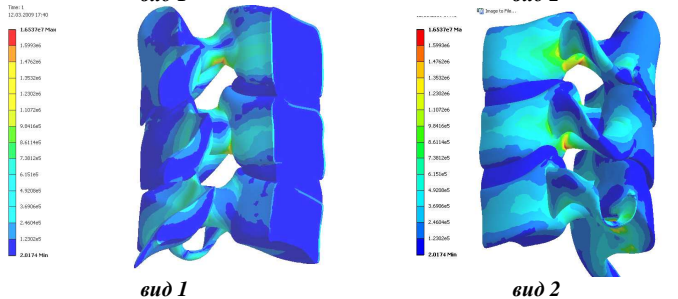


Рис. 21 – Распределение напряжений по Mises в исследуемой области геометрии с ортезом 3-й конструкции

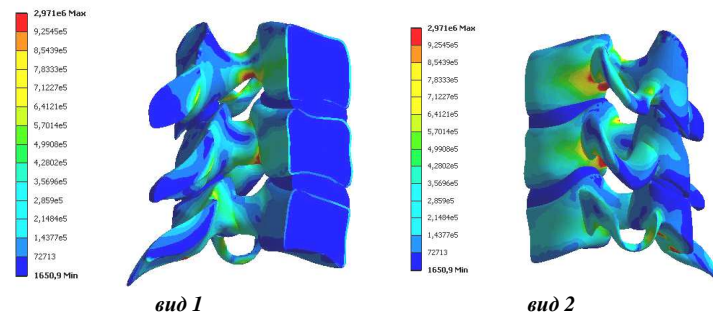


Рис. 22 – Распределение напряжений по Mises в исследуемой области геометрии с ортезом 4-й конструкции

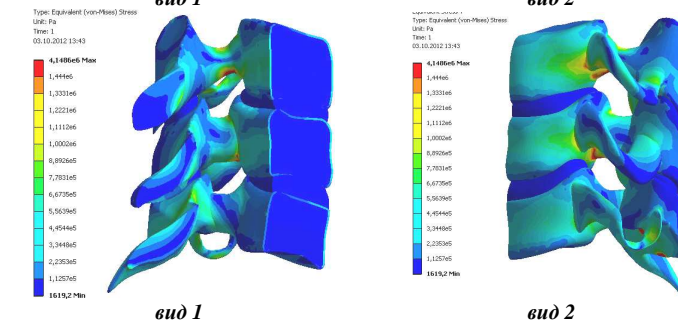


Рис. 23 – Распределение напряжений по Mises в исследуемой области геометрии с ортезом 5-й конструкции

Анализ напряжений в ортезах, изготовленных из пенополиэтилена, показал, что максимальные напряжения находятся в диапазоне 0,05 – 0,1 МПа, что не пре-

вышает предела прочности 0,15 – 0,98 МПа, для ортеза, изготовленного из поливика, предел прочности составляет 16 – 20 МПа, полученные максимальные напряжения – 0,116 МПа. Для ортеза, выполненного из поролон, предел прочности – 0,12 – 0,14 МПа, полученные максимальные напряжения – 0,00272 МПа.

Выводы. Разработанная модель шейного отдела позвоночника с ортезом обладает следующими свойствами, отличающими ее от ранее созданных.

1. Разработанная конечно-элементная модель достаточно точно описывает геометрию шейного отдела позвоночника, включая адекватное геометрическое представление позвонков, межпозвоночных дисков, ортезов, мягких тканей и хрящей.

2. Данная модель позволяет оперативно модифицировать вид исследуемой патологии позвоночного сегмента, схему оперативного лечения, а также тип и параметры применяемых ортезов.

3. Построенная модель обладает возможностями проведения многовариантных исследований с варьированием свойств костных тканей, параметров эндопротезов, конструкций и свойств материалов ортезов.

Из анализа результатов численных исследований видно, что при использовании ортеза напряжения в шейном отделе позвоночника существенно снижаются, причем как в кортикальной, так и в трабекулярной костях.

В дальнейшем будут проведены дополнительные исследования напряженно-деформированного состояния шейного отдела позвоночника с разными видами патологий, эндопротезов и ортезов.

Список литературы: 1. <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. Веретельник О.В., Веретельник Ю.В., Радченко В.О., Тимченко І.Б. Дослідження напружено-деформованого стану шийного відділу хребта з ортезом нового типу // XVIII між. научно-практ. конф. «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я» (Харьков 20-22 мая 2010 г.). – С. 173. 4. Yoganandan N., Kumarajan S., Voo L., Pintar F. Finite element applications in human cervical spine modeling // Spine. – 1996. – Vol. 21. – №15. – PP.1824–1834. 5. Барью А.Е. Конечно-элементное бисегментарное моделирование позвоночных двигательных сегментов $C_{IV} - C_{VI}$ // Ортопедия, травматология и протезирование. – 2005. – №1. – С. 41–49. 6. 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. – PP. 955–961. 7. Веретельник Ю.В., Веретельник О.В., Тимченко І.Б. и др. К вопросу о построении параметрических моделей шейного отдела позвоночника ШОП // Вісник НТУ „ХПІ” Тем. вип.: „Машинобудівництво і САПР” – 2007. – № 29. – С.16-20. 8. Nolan J.P., Sherk H.H. Biomechanical evaluation of the extensor musculature of the cervical // Spine. – 1988. –Vol.13. – № 1.– PP. 9-11. 9. 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. – PP. 861-869. 10. Веретельник О.В. Моделирование напряжений в шейном отделе позвоночника с ортезом // Вісник НТУ „ХПІ” Тем. вип.: „Машинобудівництво і САПР” – 2008. – № 9. – С. 22-29. 11. Веретельник О.В. Обзор конструктивных схем и решений по моделированию ШОП и ортезов // Вісник НТУ „ХПІ” Тем. вип.: „Машинобудівництво і САПР” – 2008. – № 42. – С. 3-8. 12. Heitzlitz 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 // Gordon and Breach Science, UK. – 1998. № 2. – PP. 387-394. 13. Веретельник О.В. Моделирование реакций на силовое воздействие элемента шейного отдела позвоночника. // Вісник НТУ „ХПІ” Тем. вип.: „Машинобудівництво і САПР” – 2008. – № 2. – С. 14-26. 14. Pierre Leroux. Compression measurement of foam with microindentation. // Nanovea – 2010. // <http://www.nanovea.com/>.

Поступила в редакцію 5.10.12