

УДК 616.717.5/6-001.5-089.84 : 004 : 001.891.57

А. И. Бодня¹, Ю. Н. Свиначев², А. И. Попов³, Н. А. Бехарский³

СРАВНИТЕЛЬНОЕ КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНЕШНИХ КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ ОСТЕОСИНТЕЗА КОСТЕЙ ПРЕДПЛЕЧЬЯ НА ОСНОВЕ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

¹Одесский национальный медицинский университет, Украина

²Одесский национальный политехнический университет, Украина

³Городская клиническая больница № 11, Одесса, Украина

Summary. Bodnya A. I., Svinarev U. N., Popov A. I., Bekharskiy N. A. **COMPARIBLE COMPUTER MODELING OF EXTERNAL CONSTRUCTION FOR OSTEOSYNTHESIS OF FOREARM'S BONES ON THE GROUND OF TERMINAL ELEMENTS.** – *Odessa National Medical University, Odessa, Ukraine.- e-mail: alex-doc2009@mail.ru.* Due to usage of existing in surgical practice devices and computer model, experimental and theoretical investigations were held with the aim to evaluate level of stable fixation of both types of devices. Mathematical calculations were fulfilled with programe's complex ANSYS. As a result it was found that devices of our shaft construction in comparison with Ilizarov's coils and wires device provide fixation of bone fragments more tightly in 34,1 times.

Key words: forearm, transosseous osteosynthesis, experiment

Реферат. Бодня А. И., Свиначев Ю. Н., Попов А. И., Бехарский Н. А. **СРАВНИТЕЛЬНОЕ КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНЕШНИХ КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ ОСТЕОСИНТЕЗА КОСТЕЙ ПРЕДПЛЕЧЬЯ НА ОСНОВЕ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ.** Проведено экспериментально-теоретическое исследование на основе натурной модели и компьютерного моделирования с целью определить и оценить жёсткость внешних конструкций на стержневой и спицевой основе при чрескостном остеосинтезе костей предплечья с помощью имитационного метода конечных элементов. Математические расчёты выполнены с помощью программного комплекса ANSYS. В результате проведенных расчётов параметры жёсткости разработанной нами модели аппарата стержневого типа превосходят показатели модели классического спицевого варианта фиксации костей предплечья по Илизарову в 34,1 раза.

Ключевые слова: предплечье, чрескостный остеосинтез, эксперимент

Реферат. Бодня О. І., Свиначев Ю. М., Попов О. І., Бехарський М. А. **ПОРІВНЯЛЬНЕ КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗОВНІШНІХ КОНСТРУКЦІЙ ДЛЯ ОСТЕОСИНТЕЗУ КІСТОК ПЕРЕДПЛІЧЧЯ НА ОСНОВІ МЕТОДУ КІНЦЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ.** Проведено експериментально-теоретичне дослідження на основі натурної моделі та комп'ютерного моделювання з метою визначити й оцінити жорсткість зовнішніх конструкцій на стержневій і спицевій основі при чрескістковому остеосинтезі кісток передпліччя за допомогою імітаційного методу кінцевих елементів. Математичні

розрахунки виконано за допомогою програмного комплексу ANSYS. В результаті проведених розрахунків параметри жорсткості розробленої нами моделі апарату стрижневого типу перевершують показники моделі класичного спицевого варіанту фіксації кісток передпліччя за Ілізаровим у 34,1 рази.

Ключові слова: передпліччя, черезкістковий остеосинтез, експеримент

Введення. Основним требованием к чрескостному остеосинтезу является обеспечение максимальной взаимной неподвижности костей предплечья при достаточной управляемости костными фрагментами для достижения их репозиции. Несмотря на имеющиеся достижения в использовании аппаратов внешней фиксации, всё же проблема лечения переломов костей предплечья остаётся актуальной до настоящего времени, поэтому поиск лучших конструкций продолжается. Среди достаточно многочисленных исследований представлены данные сравнительного анализа стабильности разных систем «аппарат-кость» на основе спиц, стержней или их сочетания [4, 5, 6]. Комплекс полученных результатов позволяет утверждать, что стержень имеет меньшую травматичность, чем спицы, в первую очередь, для мягких тканей, при большей площади его контакта с костью, которая непосредственно увеличивает жёсткость фиксации в аппарате [1]. Эти данные легли в основу разработки нашей оригинальной конструкции для чрескостного остеосинтеза диафизарных переломов костей предплечья на стержневой основе [3].

Цель работы: на основе математического моделирования методом конечных элементов (МКЭ) произвести сравнительную оценку жёсткости фиксации отломков костей предплечья на разных уровнях при чрескостном остеосинтезе спицевым аппаратом Илизарова и разработанным нами устройством стержневого типа.

Материал и методы исследования. В основу предложенной нами разработки (патент Украины № 87293) положен принцип раздельного остеосинтеза, сущность которого заключается в использовании двух конструкций, состоящих из внешней опоры и разрезенных на ней репонирующих узлов для фиксации стержней, которые проведены через отломки лучевой и локтевой костей.

Для сравнения использовали общепринятую методику остеосинтеза спицевым аппаратом Илизарова, при которой для репозиции и фиксации костей предплечья внешняя опора монтируется из четырех колец, соединенных между собой резьбовыми штангами. После проведения репонирующих (с упорной площадкой) и стабилизирующих спиц производится вправление и фиксация отломков каждой из костей предплечья.

Нами проведено экспериментально-теоретическое исследование на основе натурной модели и компьютерного моделирования чрескостного остеосинтеза костей предплечья с использованием двух видов фиксаторов (стержень, спица).

Наиболее удобными для решения задач механики в медицинских исследованиях оказались методы дискретной теории линейных пространств, таких как матричное исчисление, метод потенциала, метод граничных элементов и, безусловно, МКЭ, который мы взяли за основу в математических расчётах. Определение напряжённо-деформированного состояния в спицевых и стержневых пространственных конструкциях аппаратов выполнено с помощью программного комплекса ANSYS [7].

Несмотря на то, что МКЭ является приближённым численным методом и имеет некоторую степень погрешности, следует отметить, что он позволяет изучать конструкции почти неограниченной степени сложности. В нём заложено большое количество параметров, с помощью которых можно управлять степенью точности получаемых результатов, что невозможно с использованием аналитических методов. Однако, отдельным вопросом остаётся степень адекватности решаемой математической модели её физическому прототипу.

В ходе исследования нами путём компьютерного моделирования была определена жёсткость фиксации костных фрагментов костей предплечья в стержневом аппарате внешней фиксации и спицевом аппарате Илизарова (рис. 1).

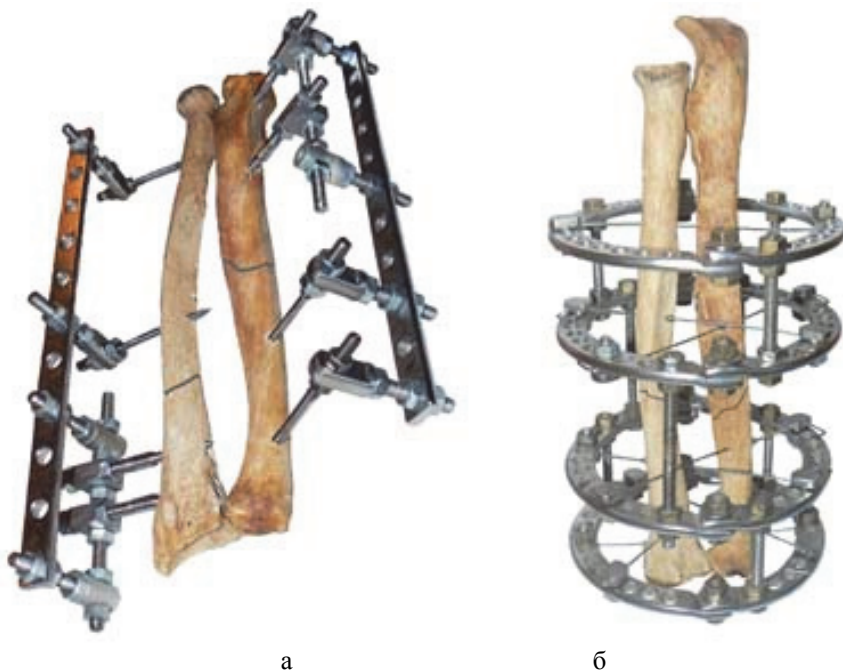


Рис. 1 Общий вид объектов исследования:
а – стержневой аппарат; б – аппарат Илизарова

Очевидно, что по конструктивной схеме представленные аппараты внешней фиксации являются сложными пространственными системами. С точки зрения механики такие системы являются пространственными конструкциями из набора толстостенных кольцевых пластин с отверстиями, стержней, спиц и резьбовых соединений, где дискретно изменяются поперечная жёсткость элементов, имеются гибкие элементы и концентраторы напряжений, а при внедрении в кость увеличивается степень внутренней статической неопределённости.

Формирование объёмной модели костей предплечья выполняли на основе поперечных сканов костей предплечья у взрослого человека с помощью компьютерного томографа Asteion Super-4. Для построения моделей вначале были получены 2D (плоские) срезы костей предплечья с шагом 0,5 мм, затем эти данные перенесены в CAD/CAM-систему Delcam. В программе с помощью сплайнов построены образы срезов и затем они расставлены в соответствии с их положением на томограмме костей предплечья. Далее была построена 3D-модель, которая адекватно отображает геометрию костей предплечья.

При выполнении численного эксперимента начальным этапом в конечно-элементном анализе конструкций аппаратов внешней фиксации было построение геометрической и конечно-элементной моделей. Геометрическая модель позволила отобразить форму и размеры рассчитываемой конструкции, а конечно-элементная модель содержала в себе полную информацию о расположении узлов и конечных элементов, а также о взаимосвязях между отдельными узлами и элементами.

В настоящей работе мы рассматривали модели из стержневых и объёмных конечных элементов, т.к. они обеспечивают соответствие модели реальной конструкции. Кроме того, в современных CAD-системах геометрические модели являются основным средством описания конструкции.

Геометрические и конечно-элементные модели исследуемых объектов выполнены на основании реальных конструкций аппаратов внешней фиксации, что позволило максимально точно отобразить их конструктивные особенности. Аппроксимация обеих моделей выполнена стержневым конечным элементом Beam188 из библиотеки конечных элементов программы ANSYS (рис. 2).

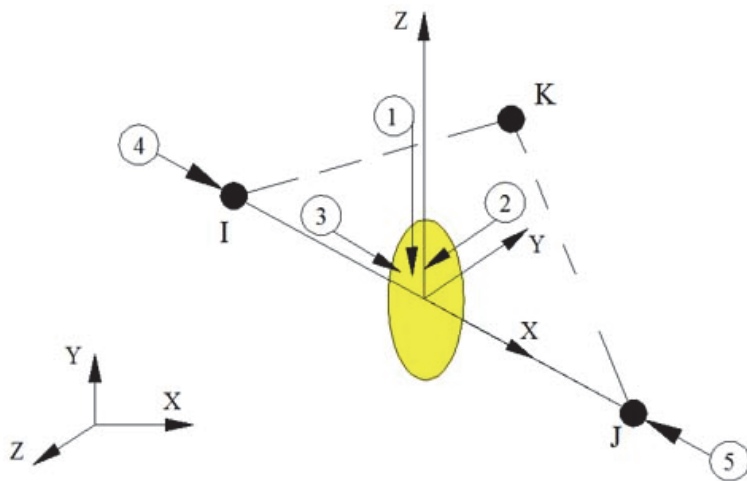


Рис. 2 Конечный элемент Beam188

Элемент предназначенный для решения пространственных задач и его свойства задаются путём описания характеристик поперечного сечения, механических свойств материала (модуля упругости, коэффициента Пуассона) и упругого основания, которые приняты для каждого варианта расчётов. Этот конечный элемент имеет два узла с шестью степенями свободы в каждом из них: перемещения в направлениях осей X , Y , Z узловой системы координат и углы поворотов вокруг этих осей.

Построенные конечно-элементные модели содержат у аппарата Илизарова 1485 узлов и 1698 элементов, при этом стержневой аппарат, соответственно, содержит 884 узла и 865 элементов. Данное количество узлов и элементов достаточно для обеспечения необходимой точности численного анализа НДС.

Аппроксимация обеих моделей выполнена объёмным конечным элементом Solid45 из библиотеки конечных элементов программы ANSYS (рис. 3). Элемент представляется следующим образом – объёмный (3D) элемент, применяемый при решении задач механики деформируемого твёрдого тела; определяется восемью узлами, каждый из которых имеет три степени свободы — линейные смещения в направлениях осей X , Y , Z узловой системы координат.

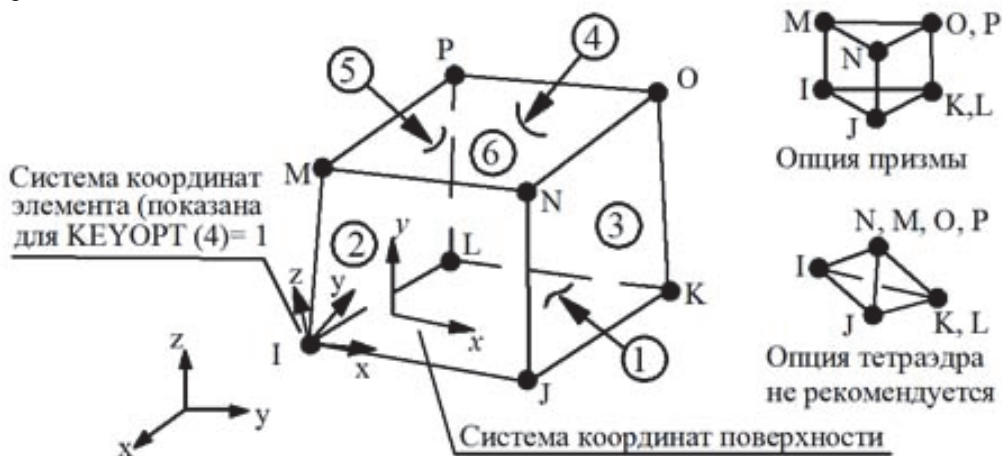


Рис. 3 Конечный элемент Solid45

Сгенерированная программой конечно-элементная модель насчитывает 81297 элементов для аппарата Илизарова и 37769 элементов для стержневого аппарата, что достаточно для обеспечения необходимой точности расчётов.

При рассмотрении стержневого аппарата внешней фиксации костей предплечья (рис. 4), с целью предотвращения изменения пространственного положения костей, к её проксимальному торцевому сечению накладывались ограничения как осевых смещений в направлениях осей X , Y , Z , так и углов поворотов φ_x , φ_y , φ_z вокруг этих осей, с учётом шарнирного соединения (подвижность костей между собой в радиоульнарном сочленении).

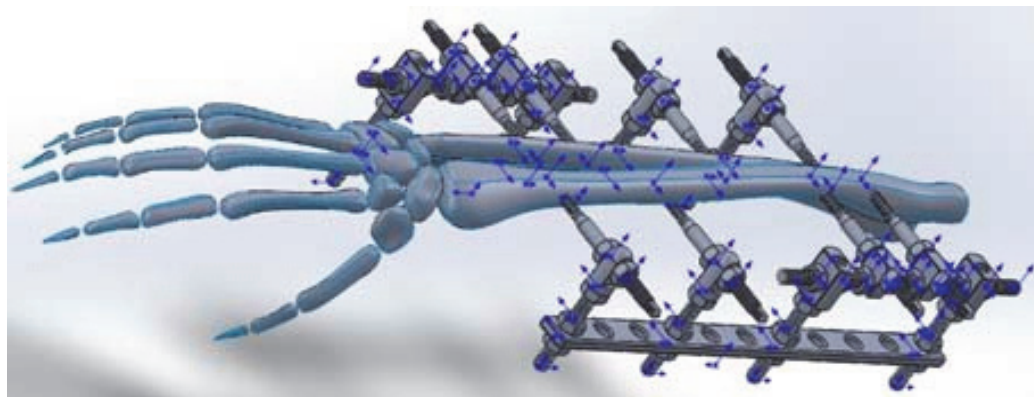


Рис. 4 Общая модель стержневого аппарата внешней фиксации

При рассмотрении спицевого аппарата Илизарова для фиксации костей предплечья (рис. 5) в местах проведения спицы через кости разрешались перемещения: угловое φ_y (вокруг оси спицы) и осевое Y (вдоль оси спицы), так как между спицей и костью отсутствует резьбовое соединение. Здесь также, как и в случае со стержневым аппаратом, накладывается запрет осевых смещений в направлении осей X , Y , Z , и углов поворотов φ_x , φ_y , φ_z вокруг этих осей на торец, без учёта шарнирного соединения (спица проходит через обе кости предплечья в радиоульнарном сочленении).

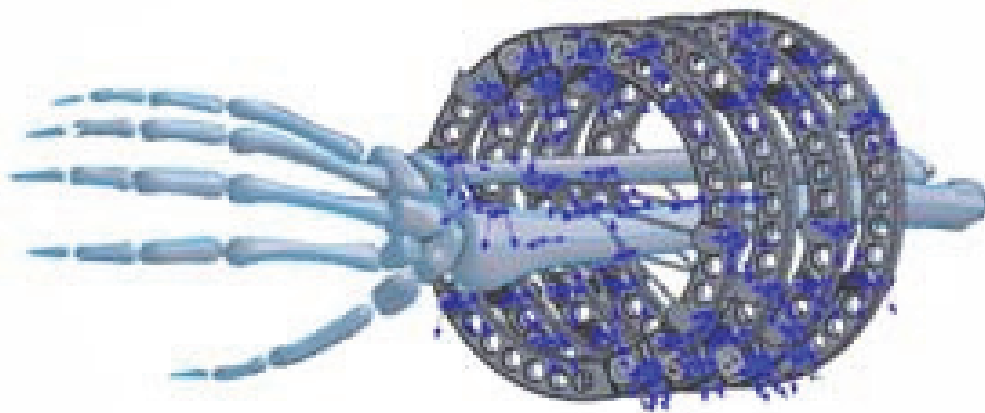


Рис. 5 Общая модель спицевого аппарата Илизарова

В результате расчётов определялись линейные и угловые перемещения дистальной части модели предплечья относительно своего равновесного положения, величина которых характеризует жёсткость конструкции. Соотношение величины эквивалентных перемещений дистальной части модели предплечья в различных конструкциях показывает соотношение жёсткостей фиксации отломков костей предплечья этими конструкциями.

Результаты и их обсуждение. Результаты расчётов показали, что относительная жёсткость моделей исследуемых конструкций не зависела от уровня перелома, поэтому в

дальнейшем при сравнении конструкций мы приводим полученные данные исследований на уровне средней трети костей предплечья.

Результатом статического расчёта и сравнительного анализа рассматриваемых моделей конструкций является оценка их НДС, параметры которого определены по каждому из вариантов моделей аппаратов внешней фиксации:

$\sigma_{экр}$ – эквивалентные напряжения по гипотезе Губера-Мизеса [2];

USUM – эквивалентные перемещения;

ROTSUM – эквивалентные углы поворотов.

Максимальные значения указанных выше параметров НДС по всем вариантам расчётов приведены в таблице.

Таблица

Максимальные значения параметров НДС

Параметры НДС	Разработанное устройство		аппарат Илизарова	
	стержневая модель	объёмная модель	стержневая модель	объёмная модель
USUM (мм)	0,0267	0,0243	0,9156	0,9071
ROTSUM (рад)	0,000136	0,000121	0,01017	0,01045
$\sigma_{экр}$ (МПа)	17,988	23,616	80,282	83,325

Анализ полученных результатов численного эксперимента выявил отличия НДС элементов предплечья в зависимости от модели применяемых конструкций для чрескостного остеосинтеза и позволил сделать ряд выводов:

1. Относительная деформация костей предплечья в стержневом аппарате:

Модель из стержневых конечных элементов

$$\varepsilon_c = \frac{\Delta l}{l} = \frac{0,0267}{235} = 1,136 \cdot 10^{-4}$$

Модель из объёмных конечных элементов

$$\varepsilon_c = \frac{\Delta l}{l} = \frac{0,0243}{235} = 1,034 \cdot 10^{-4}$$

2. Относительная деформация костей предплечья в аппарате Илизарова:

Модель из стержневых конечных элементов

$$\varepsilon_{II} = \frac{\Delta l}{l} = \frac{0,9156}{235} = 38,96 \cdot 10^{-4}$$

Модель из объёмных конечных элементов

$$\varepsilon_{II} = \frac{\Delta l}{l} = \frac{0,9071}{235} = 38,60 \cdot 10^{-4}$$

Сопоставление числовых значений напряжений и перемещений, полученных при конечно-элементном анализе исследуемых конструкций из стержневых элементов, с соответствующими значениями этих величин, полученными при расчёте с использованием объёмных элементов, позволяет сделать вывод о достоверности тех допущений, которые были приняты на этапах геометрического и конечно-элементного моделирования. Этот вывод, по-видимому, будет справедливым и в отношении граничных условий, а также величин и характера приложения внешних нагрузок. Так, в результате проведенных расчётов параметры жёсткости модели аппарата стержневого типа превосходят показатели

модели спицевого аппарата Илизарова в 34,1 раза ($\frac{\varepsilon_{II}}{\varepsilon_c} = \frac{38,96}{1.136} = 34,1$).

Выводы. Экспериментально-теоретические исследования показали, что жесткость, разработанной нами, модели устройства для стержневой фиксации костей предплечья на порядки выше в сравнении с моделью классического спицевого варианта фиксации по Илизарову.

Литература:

1. Кривенко С. Н. Сравнительная клиническая оценка внешних конструкций для остеосинтеза диафизарных переломов костей предплечья / С. Н. Кривенко, А. И. Бодня, Баккар Тарек // Травма. – 2013. – Т.14, №4. – С. 26-29.
2. Опір матеріалів : підручник / Г. С. Писаренко, О. Л. Квітка, Е. С. Уманський; за ред. Г. С. Писаренка. – К.: Вища школа, 1993. – 655 с.
3. Патент України на корисну модель № 87293 UA МПК А61В 17/58 (2006.01) Пристрій для черезкісткового остеосинтезу діафізарних переломів кісток передпліччя / О.І. Бодня, Баккар Тарек. – № u 201300787; заявл. 23.01.13; опубл. 10.02.14, Бюл. № 3. – 4 с.
4. Сравнительный анализ жёсткости остеосинтеза, обеспечиваемой чрескостными аппаратами, работающими на основе компьютерной навигации, и комбинированным спице-стержневым аппаратом / Л. Н. Соломин, В. А. Виленский, А. И. Утехин, В. Террел // Травматология и ортопедия России. – 2009. – № 2. – С. 20-25.
5. Сравнительная характеристика стабильности фиксации некоторых современных аппаратов для чрескостного остеосинтеза / А. И. Городниченко, Н. С. Гаврюшенко, М. Е. Казаков, В. М. Керничанский // Вестник травматологии и ортопедии. – 1999. – № 4. – С. 49-52.
6. Хмызов С. А. Сравнительный анализ свойств некоторых стержневых аппаратов внешней фиксации / С. А. Хмызов, С. Р. Михайлов // Ортопедия, травматология и протезирование. – 2003. – № 3. – С. 100-106.
7. ANSYS Workbench. User's Guide. Release 12.1, 2009. – 124 p.

References:

1. Krivenko S. N. Comparative clinical evaluation of external constructions for osteosynthesis of diaphyseal fractures of the forearm / S. N. Krivenko, A. I. Bodnya, Bakkar Tarek // Trauma. – 2013. – Vol. 14, № 4. – P. 26-29 (Rus.).
2. Mechanics of materials : a textbook / G. S. Pisarenko, A. L. Flower, E. S. Umansky; Ed. by G. S. Pisarenko. – K.: Higher school, 1993. – 655 p. (Ukr.).
3. Patent of Ukraine for useful model № 87293 UA IPC A61B 17/58 (2006.01) a Device for cersco osteosynthesis of diaphyseal fractures of the forearm / A.I. Bodnya, Bakkar Tarek. – № a 201300787; appl. 23.01.13; publ. 10.02.14, Bul. № 3. – 4 p. (Ukr.).
4. Comparative analysis of the rigidity of osteosynthesis, transosseous provide apparatus operating on the basis of computer navigation, and the combined pin-rod apparatus / L. N. Solomin, V. A. Vilensky, I.A. Utekhin, W. Terrell // Traumatology and orthopedics Russia. – 2009. – № 2. – P. 20-25 (Rus.).
5. Comparative characteristics of stability of fixation of some modern devices for transosseous osteosynthesis / A. I. Gorodnichenko, N. S. Gavrushenko, M. E. Kazakov, V.M. Chernicinsky // Bulletin of traumatology and orthopedics. – 1999. – № 4. – P. 49-52.
6. Khmyzov S. A. Comparative analysis of the properties of some rod apparatus of external fixation / S. A. Khmyzov, S. R. Mikhailov // Orthopedics, traumatology and prosthetics. – 2003. – № 3. – P. 100-106. (Rus.).
7. ANSYS Workbench. User's Guide. Release 12.1, 2009. – 124 p.