

УДК 616.718.4-002.4-021.4:616.728.2]-053.2:004.94(045)

DOI: <http://dx.doi.org/10.15674/0030-598720184102-106>

Дослідження напружено-деформованого стану елементів кульшового суглоба у випадках асептичного некрозу головки стегнової кістки в дітей (повідомлення друге)

О. І. Корольков¹, Є. С. Кацалап², М. Ю. Карпінський², О. В. Ярьсько²

¹ КЗ ЛОР Львівська обласна дитяча клінічна лікарня «ОХМАТДИТ». Україна

² ДУ «Інститут патології хребта та суглобів ім. проф. М. І. Ситенка НАМН України», Харків

Objective: to study the stress-strain state of the hip joint elements in cases of different localization of the destruction of the femoral head due to aseptic necrosis in children with lesions 50 and 75 % of its volume. Methods: on mathematical models of the hip joint, the stress-strain state was investigated in the case of femoral head defects of 50 and 75 % of its volume of various localization. The model consisted of components with the properties of cancellous and compact bone tissue, as well as with growth zones with the mechanical characteristics of cartilage. The models were loaded with a vertical distributed force of 270 N. Reproduced the action m. gluteus medius of 450 N and m. gluteus minimus force of 200 N. Results: when we increased the area of the femoral head defect up to 50 % at weight bearing on a limb the values of maximum stresses increased in all studied areas of the model compared to the normal state and the case of 25 % defect. At increased defect up to 75 % in the critical zone, the stress-strain state reached the number of 31.9 MPa, stress increased on its lateral edge in the cortical layer up to 25.6 MPa, and in the cancellous bone up to 9.1 MPa. Stress decreased on the medial edge of the defect to 5.0 MPa in the cortical layer and up to 0.8 MPa — in the cancellous bone. Near the middle part of the defect stress increased in the cortical layer to 4.8 MPa, and in the cancellous bone decreased to 0.8 MPa. Conclusions: in the models with a lesions size of 50 and 75 %, the most unfavorable is the location of the defect on the border of the upper edge of the acetabulum and the upper part of the femoral head, in the zone of its greatest load. If the volume of the femoral head goes up to 50 %, with the weight bearing on the limb the values of maximum stresses increase practically on all studied areas of the hip joint model. The size of the lesion of the femoral head up to 75 % leads to an increasing of magnitude of the stresses in the loaded areas and to a decreasing in other investigated areas. Key words: aseptic necrosis of the femoral head in children, finite element model, biomechanical studies.

Цель: изучить напряженно-деформированное состояние (НДС) компонентов тазобедренного сустава в случаях различной локализации разрушения головки бедренной кости (ГБК) вследствие асептического некроза у детей с поражением 50 и 75 % от ее объема. Методы: на математических моделях тазобедренного сустава исследовано НДС в случае дефектов ГБК 50 и 75 % от ее объема различной локализации. В состав модели входили компоненты со свойствами губчатой и компактной костной ткани, а также зоны роста с механическими характеристиками хряща. Модели нагружали вертикальной распределенной силой величиной 270 Н. Воспроизводили действие m. gluteus medius силой 450 Н и m. gluteus minimus силой 200 Н. Результаты: при увеличении величины дефекта головки бедренной кости до 50 % от площади ее суставной поверхности при опоре на конечность возрастают величины максимальных напряжений практически на всех исследованных участках модели по сравнению с нормой и случаем с дефектом 25 %. При увеличении дефекта до 75 % в критической зоне НДС достигло показателя 31,9 МПа, по его латеральному краю отмечено увеличение величины напряжений в корковом слое до 25,6 МПа, а в губчатой кости — до 9,1 МПа. По медиальном краю дефекта зафиксировано уменьшение величин напряжений до 5,0 МПа в корковом слое и до 0,8 МПа — в губчатой кости. Вблизи средней части дефекта напряжение возросло в корковом слое до 4,8 МПа, а в губчатой кости снизилось до 0,8 МПа. Выводы: в моделях с объемом поражения ГБК 50 и 75 % наиболее неблагоприятным является расположение дефекта на границе верхнего края вертлужной впадины и верхней части ГБК, в зоне ее наибольшей нагрузки. Если объем поражения ГБК достигает 50 %, при опоре на конечность возрастают величины максимальных напряжений практически на всех исследованных участках модели ГБК. Увеличения размера поражения ГБК до 75 % приводит к повышению величин напряжений в нагружаемых участках и к снижению в других исследованных зонах. Ключевые слова: асептический некроз головки бедренной кости у детей, конечно-элементная модель, биомеханические исследования.

Ключові слова: асептичний некроз головки стегнової кістки у дітей, скінченно-елементна модель, біомеханічні дослідження

Вступ

На першому етапі нашого дослідження визначено інтенсивність напружено-деформованого стану (НДС) компонентів кульшового суглоба (КС) у випадках різної локалізації руйнування головки стегнової кістки (ГСК) унаслідок асептичного некрозу (АН) у дітей з ураженням 25 % від її об'єму [1]. Отримані дані свідчать, що найбільш несприятливою є локалізація АНГСК на межі верхнього краю кульшової западини та верхньої частини ГСК (у цьому варіанті виявлено вищий рівень напружень практично у всіх досліджених ділянках стегнової кістки, який сягає 22,0 МПа за норми 9,0 МПа, тобто перевищує її у 2,5 разу). Це обумовлено найбільшим навантаженням цієї зони в процесі ходьби [1].

Складніша ситуація виникає у випадках, коли внаслідок АН дефект ГСК становить 50 та 75 % від її об'єму, що відповідає III та IV типам ураження за класифікацією А. Catterall [2]. Можна передбачити, що в разі такого обсягу ураження ГСК інтенсивність НДС компонентів КС значно збільшується в певних зонах, а в інших — зменшується. Важливість досліджень саме таких типів уражень ГСК обумовлена тим, що проблема лікування АНГСК у дітей із III і IV типами ураження за класифікацією А. Catterall залишається до кінця невирішеною, а результати лікування далекі від оптимальних [3, 4].

Мета дослідження: вивчити напружено-деформований стан компонентів кульшового суглоба у випадках різної локалізації руйнування головки стегнової кістки внаслідок асептичного некрозу у дітей з ураженням 50 та 75 % від її об'єму.

Матеріал і методи

У лабораторії біомеханіки ДУ «ПХС ім. проф. М. І. Ситенка НАМН України» проведено математичні дослідження НДС моделей КС у випадках руйнування ГСК різного обсягу та локалізації дефектів унаслідок АНГСК. Для цього побудовано спрощену скінченно-елементну модель (СЕМ), яка складалася із таза та двох стегнових кісток [1]. Кісткові елементи моделі мали властивості губчастої та коркової кістки, містили наросткову зону з механічними характеристиками хрящової тканини. Суглобові поверхні ГСК та кульшової западини вкриті шаром із механічними властивостями хряща. Таку базову модель КС [1] використано для визначення НДС у випад-

ку нормальної будови суглоба, результати стали контролем для інших досліджень. Для моделювання варіантів змін НДС за умов АНГСК застосовано дві моделі КС із дефектами ГСК розміром 50 та 75 % від її обсягу (рис. 1).

У процесі дослідження моделювали одноопорне стояння на лівій кінцівці. Для цього моделі навантажували вертикально розподіленою силою величиною 270 Н, що відповідає середній вазі дитини у випадку одноопорного стояння (35 кг без урахування ваги опорної кінцівки), яку прикладали до крижового відділу хребта. Між великим вертлюгом лівої стегнової кістки та крилом клубової імітували дію привідних м'язів стегна шляхом введення відповідних сил. Моделювали дію *m. gluteus medius* (середній сідничний м'яз) силою 450 Н та *m. gluteus minimus* (малий сідничний м'яз) силою 200 Н. У ділянці КС на рівні виростків лівої стегнової кістки всі моделі мали жорстке закріплення. Схему навантаження моделей було наведено в нашій попередній роботі [1].

Матеріал вважали однорідним та ізотропним. За найменший скінченний елемент обрано 10-вузловий тетраедр із квадратичною апроксимацією [5]. Механічні властивості біологічних тканин обрано зі спеціальної літератури [6]. Використано такі характеристики, як модуль пружності E (модуль Юнга), коефіцієнт Пуассона ν . Механічні характеристики матеріалів, застосованих у розрахунках, ми наводили в попередньому дослідженні [1].

Для порівняння змін НДС різних варіантів моделей вивчали величину механічних напружень у контрольних точках, схему розташування цих точок на моделі КС у нормі: ізометричній і фронтальній проекціях; розрізі у фронтальній площині подовали в першому повідомленні [1].

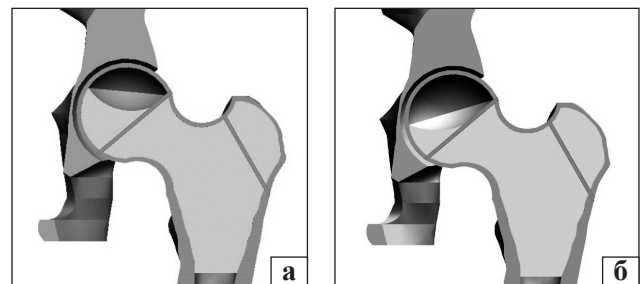


Рис. 1. Варіанти СЕМ кульшового суглоба з дефектом ГСК 50 (а) і 75 % (б) від її обсягу

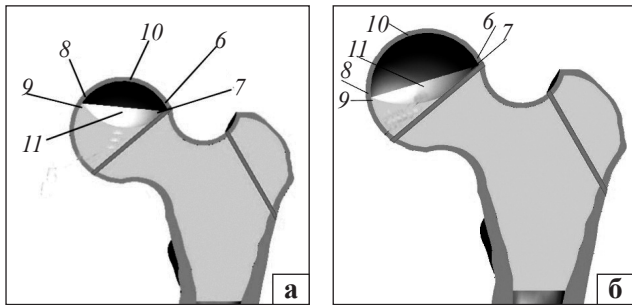


Рис. 2. Схема розташування контрольних точок навколо зони дефекту ГСК: розміром 50 (а) і 75 % (б) її обсягу

Оскільки під час дослідження змінювали розміри та розташування зони дефекта, контрольні точки 6–11, розташовані навколо неї, також змінювали своє положення (рис. 2).

Вивчали НДС моделей за допомогою методу скінченних елементів, за критерії оцінки використано напруження за Мізесом [7]. Моделювання виконували зі застосуванням системи автоматизованого проектування SolidWorks, розрахунки програмного комплексу CosmosM [8].

Результати та їх обговорення

Як було вказано, на цьому етапі роботи вивчено НДС моделі за наявності великих дефектів ГСК величиною у 50 та 75 % від її обсягу. Оскільки раніше ми визначилися із зонами розташування дефекту ГСК, які супроводжуються найбільшими змінами НДС, то подальші ситуації моделювали лише в цих ділянках. На рис. 3 наведено картину розподілу напружень у моделі з дефектом ГСК величиною в 50 % від її об'єму.

Виходячи з результатів моделювання, збільшення величини дефекту ГСК до 50 % від площі її суглобової поверхні призводило до подальшого зростання величини напружень практично на всіх досліджених зонах моделі. Найбільш напруженою (28,6 МПа) залишилася перехідна ділянка від верхньої частини шийки до головки під наростковою зоною. Під наростковою зоною величина напружень декілька нижча — 17,7 МПа, але цей показник також перевищував значення, отримані в моделі з 25 % дефектом [1]. У нижній частині шийки стегнової кістки максимальна величина напружень підвищилася до 17,8 МПа, у верхній — до 12,5 МПа і залишилася нижчою за модель без дефекту. Також зросли величини напружень у медіальній частині ГСК до 5,2 МПа, у губчастій кістці в центрі головки — до 0,9 МПа.

У корковому шарі навколо дефекту максимального значення 23,0 МПа напруження набули на його латеральному краї, оскільки саме ця

ділянка зазнає навантаження під час стояння. У центральній ділянці дефекту величина напружень досягла позначки 8,2 МПа, на медіальному знизилася до 3,1 МПа, оскільки він знаходився нижче зони основного навантаження ГСК. У губчастій кістці максимальні значення напружень (6,5 МПа) встановлено навколо латерального краю дефекту, мінімальні (1,5 МПа) — навколо центральної, близько медіального краю — 2,2 МПа.

Зі збільшенням дефекту до 75 % від площі суглобової поверхні ГСК знову визначено зміну картини розподілу напружень у моделі (рис. 4).

У результаті дослідження отримано дані, які свідчать, що зі зростанням обсягу ураження ГСК до 75 % знизилася величини максимальних напружень у шести контрольних точках моделі КС порівняно з моделлю із 50 % об'ємом ураження, ще в одній точці величина напружень залишилася без змін. Такий, на перший погляд, парадоксальний результат моделювання має досить просте пояснення — «пустота» не може чинити опір.

Напруження в найбільш критичній точці всіх СЕМ КС, у перехідній ділянці від верхньої частини шийки до ГСК, під наростковою зоною, продовжувало зростати і досягло значення 31,9 МПа. Водночас незначно знизився рівень максимальних напружень під наростковою зоною до 16,9 МПа. У нижній частині шийки стегнової кістки величина напружень також незначно зменшилася до 17,3 МПа, а у верхній — дещо збільшилася до 12,6 МПа. Зовсім без змін порівняно з моделлю КС із 50 % обсягом ураження лишилися величини максимальних напружень на медіальній поверхні ГСК — 5,2 МПа, проте на верхній підвищилися до 7,5 МПа.

Навколо дефекту ГСК величини напружень зросли на його латеральному краї — як у корковому шарі (до 25,6 МПа), так і в губчастій кістці (до 9,1 МПа). На медіальному краї дефекту ГСК, навпаки, спостерігали зменшення величин напружень до 5,0 МПа в корковому шарі та до 0,8 МПа — в губчастій кістці. Близько середньої частини дефекту ГСК спостерігали збільшення величини напружень до 4,8 МПа в корковому шарі, оскільки лише він сприймає навантаження в цій ділянці, з одночасним їхнім зниженням до 0,8 МПа в губчастій кістці, що пояснюється відсутністю безпосереднього контакту між нею та корковим шаром у цій ділянці.

Для зручнішого порівняння величин максимальних напружень у моделях із дефектом ГСК 50 та 75 % між собою та з моделлю з нормальною будовою ГСК побудовано діаграму (рис. 5).

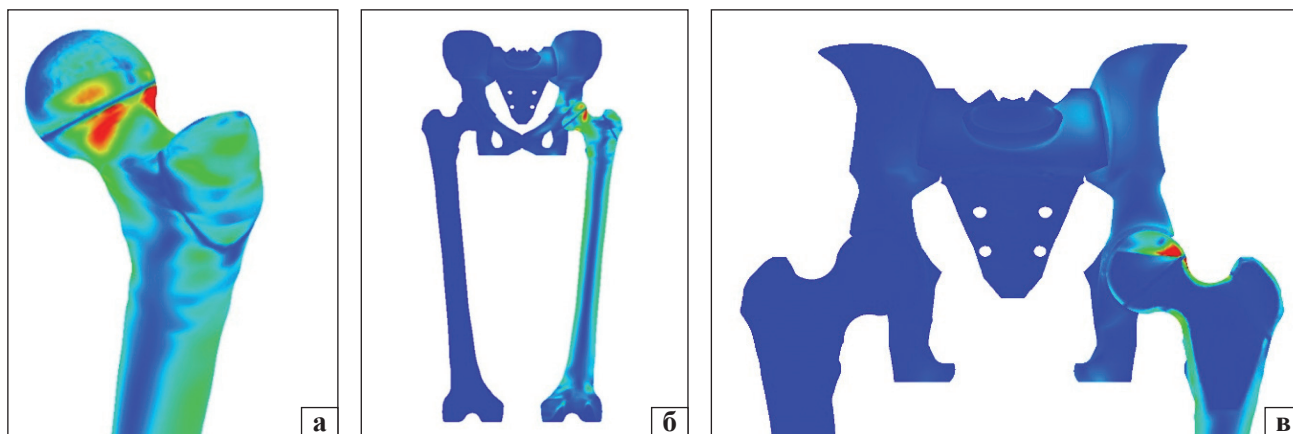


Рис. 3. Картина НДС моделі КС з дефектом ГСК у 50 % від її обсягу: ізометрична (а) і фронтальна (б) проєкції; розріз у фронтальній площині (в)

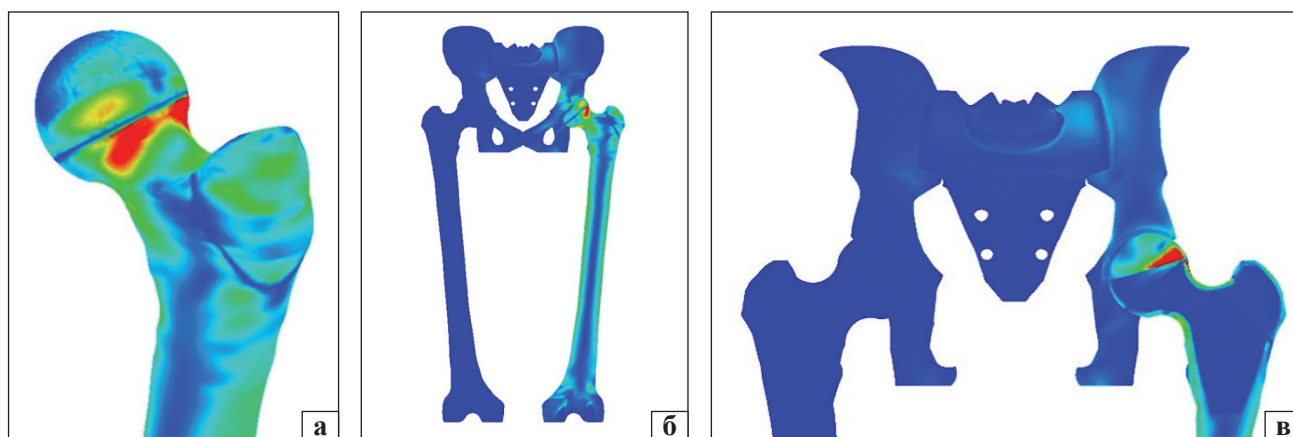


Рис. 4. Картина НДС моделі КС з дефектом ГСК 75 % суглобової поверхні: ізометрична (а) та фронтальна (б) проєкції; розріз у фронтальній площині (в)

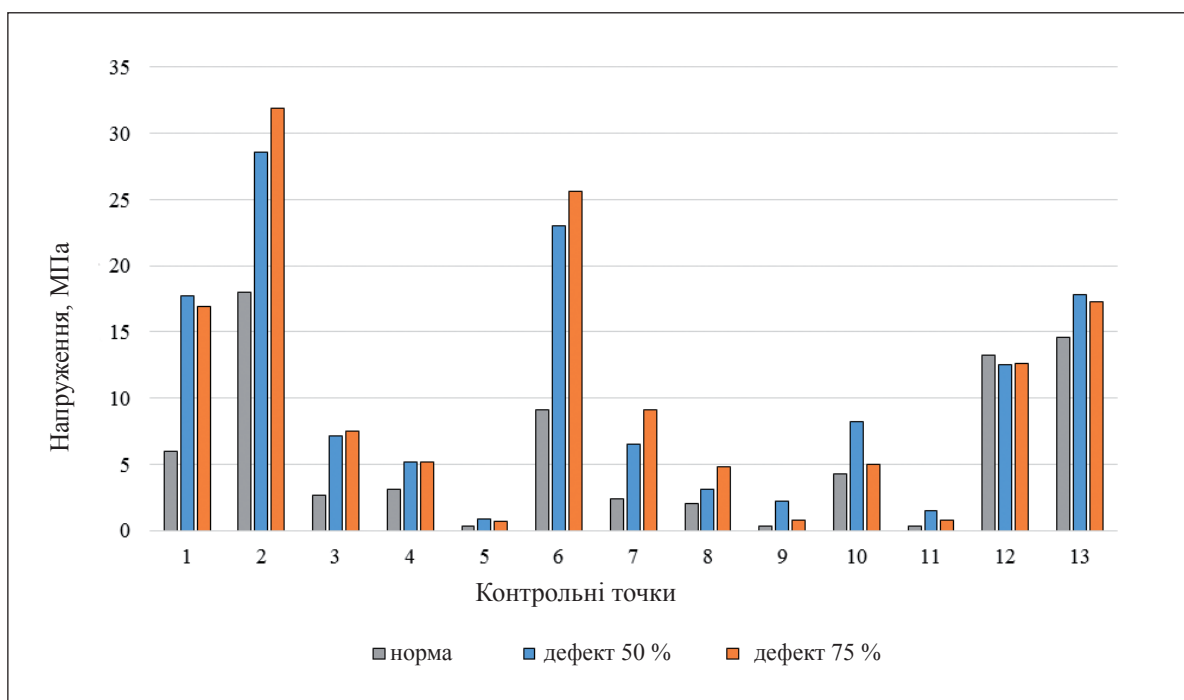


Рис. 5. Діаграма величин напружень у моделях у нормі та за наявності дефекту ГСК 50 і 75 % суглобової поверхні

Вона дає наочне уявлення про різницю напружень в усіх контрольних точках досліджених моделей.

Результати проведеної роботи показали, що зі збільшенням величини дефекту ГСК до 50 % від площі її суглобової поверхні під час опору на кінцівку зростають величини максимальних напружень практично на всіх досліджених ділянках моделі порівняно як з нормою, так і з моделями із 25 % дефектом. Подальше розростання дефекту до 75 % спричинює підвищення величин напружень у ділянках, розташованих безпосередньо під навантаженням, та зниження величини напружень в інших досліджених зонах.

Висновки

Результати проведеного дослідження дають змогу стверджувати, що з огляду на розподіл напружень у моделях з обсягом ураження ГСК 50 % найбільш несприятливим є розташування дефекту ГСК у ділянці на межі верхнього краю кульшової западини та верхньої частини ГСК, у зоні її найбільшого навантаження. У випадку обсягу ураження ГСК у 50 % за умов опору на кінцівку відбувається зростання величин максимальних напружень практично на всіх досліджених ділянках моделі КС порівняно як з нормою, так і з моделями із 25 % обсягом ураження.

Моделювання збільшення розміру дефекту ГСК до величини 75 % призводить до підвищення величин напружень у ділянках, які зазнають навантаження, та до зниження в інших досліджених зонах. Зокрема, навколо дефекту ГСК у 75 % величини напружень зростають на її латеральному краї у корковому шарі до 25,6 МПа, а в губчастій кістці — до 9,1 МПа. На медіальному краї дефекту ГСК, навпаки, спостерігається зменшення величин напружень до 5,0 МПа в корковому

шарі та до 0,8 МПа — у губчастій кістці, а навколо середньої частини дефекту ГСК — одночасне їх зниження до 0,8 МПа в губчастій кістці, що пояснюється відсутністю безпосереднього контакту між нею та корковим шаром у цій ділянці.

Конфлікт інтересів. Автори декларують відсутність конфлікту інтересів.

Список літератури

1. Напружено-деформований стан кульшового суглоба в дітей з асептичним некрозом головки стегнової кістки (повідомлення перше) / О. І. Корольков, Є. С. Кацалап, М. Ю. Карпінський, О. В. Яресько // Ортопедия, травматология и протезирование. — 2018. — № 3. — С. 85–92. — DOI: 10.15674/0030-59872018385-92.
2. Qain S. Hinge abduction of the hip. Diagnosis and treatment / S. Qain, A. Catterall // Journal of Bone and Joint Surgery. Br. — 1986. — 68 (1). — P. 61–65.
3. Legg-Calvé-Perthes disease: current concepts / G. H. Thompson, C. T. Price, D. Roy [et al.] // Instr. Course Lect. — 2002. — Vol. 51. — P. 367–384.
4. Гайко Г. В. Ускладнений перебіг хвороби Легг-Кальве-Пертеса / Г. В. Гайко, В. В. Філіпчук, М. І. Хархун // Ортопедия, травматология и протезирование. — 2003. — № 2. — С. 27–29.
5. Агапов В. П. Метод конечных элементов в статике, динамике и устойчивости пространственных тонкостенных подкрепленных конструкций : уч. пособие / В. П. Агапов. — М. : АСВ, 2000. — 152 с.
6. Пат. 31078 Україна. МПК G09B 23/28 (2006.01). Спосіб моделювання кульшового суглоба / Корольков О. І. ; заявник і патентовласник ІПХС ім. проф. М. І. Ситенка АМН України. — № u200713080, заявл. 26.11.2007 ; опубл. 25.03.2008 ; Бюл. № 6.
7. Zienkiewicz O. C. The finite element method for solid and structural mechanics / O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor. — 6th ed. — Butterworth-Heinemann, 2005. — 736 p.
8. Березовский В. А. Биофизические характеристики тканей человека : справочник / В. А. Березовский, Н. Н. Колотилов. — К. : Наукова думка, 1990. — 224 с.
9. Алямовский А. А. SolidWorks/COSMOSWorks. Инженерный анализ методом конечных элементов / А. А. Алямовский. — М. : ДМК Пресс, 2004. — 432 с.
10. Tsumura H. Three-dimensional model pressure distribution of the human hip joint — comparison between normal hips and dysplastic hips / H. Tsumura, H. Miura, Y. Iwamoto // Fukuoka Igaku Zasshi. — 1998. — Vol. 89 (4). — P. 109–118.

Стаття надійшла до редакції 13.07.2018

STUDYING OF STRESS-STRAIN STATE OF HIP JOINT ELEMENTS IN CASE OF ASEPTIC FEMORAL HEAD NECROSIS IN CHILDREN (THE SECOND MESSAGE)

O. I. Korolkov ¹, Ye. S. Katsalap ², M. Yu. Karpinsky ², O. V. Yaresko ²

¹ Lviv Regional Children's Specialized Clinical Hospital. Ukraine

² Sytenko Institute of Spine and Joint Pathology National Academy of Medical Sciences of Ukraine, Kharkiv

✉ Oleksandr Korolkov, MD in Traumatology and Orthopaedics: korolkovmd@gmail.com

✉ Yelyzaveta Katsalap: lizunichka27@gmail.com

✉ Mykhaylo Karpinsky: korab.karpinsky9@gmail.com

✉ Oleksandr Yaresko: avyresko@gmail.com