

13. Mackinnon S.E. Changes in nerve fiber numbers distal to a nerve repair in the rat sciatic nerve model / Mackinnon S.E., Dellon A.L., O'Brien J.P. // Muscle Nerve. — 1991. — Vol. 14. — P. 1116–1122.
14. Mackinnon S.E. Histologic assessment of nerve regeneration in the rat / Mackinnon S.E., Hudson A.R., Hunter D.A. // Plast. Reconstr. Surg. — 1985. — Vol. 75. — P. 384–388.
15. Neural tissue formation within porous hydrogels implanted in brain and spinal cord lesions : ultrastructural, immunohistochemical, and diffusion studies / Woerly S., Petrov P., Sykova E. [et al.] // Tissue Engineering. — 1999. — № 5. — P. 467–488.
16. Rat walking tracks do not reflect maximal muscle force capacity / Urbancsek M.S., Chung K.C., Asato H. [et al.] // J. Reconstr. Microsurg. — 1999. — Vol. 15. — P. 143–149.
17. Walking track analysis : an assessment method for functional recovery after sciatic nerve injury in the rat / Sarikcioglu L., Sarikcioglu L., Demirel B.M. [et al.] // Folia Morphol. — 2009. — Vol. 68, № 1. — P. 1–7.
18. Wong B.J. Experimental nerve regeneration. A review / B.J. Wong, D.E. Mattox // Otolaryngol. Clin. North. Am. — 1991. — Vol. 24, № 3. — P. 739–752.

УДК 617.57:616.72-002.77:612.76

## **МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ З ВИЗНАЧЕННЯМ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ В ТІБІО-ФЕМОРАЛЬНІЙ ЗОНІ В УМОВАХ ПОЄДНАНИХ УШКОДЖЕНЬ СУГЛОБОВОГО ХРЯЦА ТА ПІСЛЯОПЕРАЦІЙНОГО ДЕФЕКТУ МЕНІСКА**

*I. A. Лазарев, О. А. Костогрыз, М. В. Скибан  
ДУ “Інститут травматології та ортопедії НАМН України”, м. Київ*

### **MATHEMATICAL MODELLING WITH DEFINITION OF STRESS-AND-STRAIN CONDITION IN TIBIO-FEMORAL ZONE IN COMBINED INJURIES OF ARTICULAR CARTILAGE AND POSTOPERATIVE MENISCUS DEFECTS**

*I. A. Lazarev, O. A. Kostobryz, M. V. Skiban*

*It is necessary to restore anatomical structure and function of the knee joint after damages caused by combined injury of the articular cartilage and meniscus. Stress-and-strain condition of biomechanical pattern elements of the knee joint that is medial epicondyle of the femur, articular cartilage with 5mm, 10mm, 15mm and 20 mm defect and 6 types of medial meniscus postoperative defects were defined on the basis of mathematical modeling by the finite-element method. Articular cartilage strain increased with increase of its defect size and it also depended from meniscus defect type. In increase of cartilage defect size from 5 to 20 mm the cartilage strain (3.5 MPa intact) increased from 55.3% in postoperative defect of 50% medial meniscus body to 182.2% in the total defect of posterior horn and medial meniscus body. In increase of cartilage defect from 5 mm to 20 mm the meniscus strain (5.13 MPa intact) increased from 3% in postoperative defect of 50% medial meniscus body and posterior horn to 80.1% in total posterior horn defect of the medial meniscus. Under condition of dynamic loads that is walking in everyday life such strains can lead to the fast progress of degenerate changes of the knee joint. These calculations aim the surgeon at the definition of surgery tactics directed on unloading of the affected area in the tibio-femoral zone.*

*Key words: knee joint, tibio-femoral zone, articular cartilage defect, finite elements modeling, strain and deformations.*

### **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ С ОПРЕДЕЛЕНИЕМ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В ТИБИО-ФЕМОРАЛЬНОЙ ЗОНЕ В УСЛОВИЯХ СОЧЕТАННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ СУСТАВНОГО ХРЯЦА И ПОСЛЕОПЕРАЦИОННОГО ДЕФЕКТА МЕНИСКА**

*I. A. Лазарев, О. А. Костогрыз, М. В. Скибан*

*Существует необходимость восстановления анатомического строения и функции коленного сустава, вызванных сочетанной травмой суставного хряща и мениска. На основе математического моделирования методом конечных элементов определено напряженно-деформированное состояние элементов биомеханической модели коленного сустава — медиального надмыщелка бедренной*

кости, суставного хряща с наличием дефекта размером 5, 10, 15 и 20 мм и медиального мениска, с 6 типами послеоперационного дефекта. Напряжения на суставном хряще увеличиваются в зависимости от увеличения размера его дефекта и типа дефекта мениска. При увеличении размера дефекта хряща с 5 до 20 мм напряжение на хряще (3,5 МПа интактный) увеличивается от 55,3% при послеоперационном дефекте тела медиального мениска площадью 50%, до 182,2% — при тотальном дефекте заднего рога и тела медиального мениска. При увеличении размера дефекта хряща с 5 до 20 мм напряжение на мениске (5,13 МПа интактный) увеличивается от 3% при послеоперационном дефекте тела и заднего рога площадью 50%, до 80,1% — при тотальном послеоперационном дефекте заднего рога медиального мениска. В условиях динамической нагрузки — при ходьбе в повседневной жизни, такие напряжения могут способствовать быстрому прогрессированию дегенеративных изменений в структурах коленного сустава. Проведенные расчеты нацеливают хирурга на определение тактики оперативного вмешательства, направленной на разгрузку поврежденного участка в тиббио-фemorальной зоне.

*Ключевые слова:* коленный сустав, тиббио-фemorальная зона, дефект суставного хряща, конечно-элементное моделирование, напряжение и деформации.

## Вступ

Механічні ушкодження хряща колінного суглоба є однією з причин розвитку вторинного остеоартрозу, в основі якого лежить несумісність між механічними навантаженнями та станом суглобового хряща [И. В. Шумада, 1990; А. Т. Бруско, 1995; П. М. Москотін 1998; П. И. Снисаренко, 2000; J. A. Buckwalter, 1997; C. Ding, 2006]. Так, за результатами власних досліджень, концентрація напружень у тибіо-фemorальній зоні спостерігається вже при дефекті 5 мм за рахунок “крайового ефекту” [10]. Зі збільшенням розміру дефекту суглобового хряща значно збільшується руйнівний вплив навантаження як на суглобовий хрящ (на 181,14%), так і на субхондріальну кістку в зоні дефекту (на 25,6%). В умовах динамічних рухів у повсякденному житті такі напруження можуть сприяти швидкому прогресуванню дегенеративних змін у структурах колінного суглоба.

При інтактних менисках підвищення контактного навантаження по краю дефекту суглобового хряща сприймається менисками та зменшується за рахунок їх еластичної деформації. Однак, ситуація кардинально змінюється в умовах ушкодження менисків або їх дегенеративних змін [2]. Виходячи з класифікації ушкоджень менисків, існують поздовжні, радіальні та горизонтальні розриви; за видами ушкоджень — горизонтальні, поперечні, поздовжні (у тому числі за типом “ручки лійки”), клаптеподібні, дегенеративні, складні (D. Kohn, 1991). За результатами власних досліджень у 96% ушкоджується задній ріг та тіло мениска (переважно задній ріг). Залежно від виду ушкодження мениска тактика хірурга направлена на усунення механічного незіставлення в порожнині суглоба й полягає в резекції ушкодженої частини мениска (97%), його зшиванні або в комбінації вказаних маніпуляцій. Наявність післяопераційного дефекту мениска значно змінює рівень навантажень на суглобовий хрящ, особливо в ділянках його ушкодження. Так, край дефекту суглобового хряща та край ушкодженого мениска являють собою місця концентрації локальних напружень та деформацій, за рахунок зменшення контактної зони та збільшення середнього контактного зусилля [1, 3–5]. Розподіл сил змінюється залежно від кута згинання в колінному суглобі [6].

**Мета** дослідження — на основі математичного моделювання методом скінчених елементів визначити напружено-деформований стан елементів біомеханічної моделі колінного суглоба при наявності дефектів суглобового хряща у поєднанні з різними типами післяопераційних дефектів медіального мениска в умовах дії функціонального навантаження при одноопорному стоянні (1BW).

## Матеріали і методи

Для оцінювання напружено-деформованого стану (НДС) методом скінчених елементів побудовані розрахункові комп'ютерні 3D-моделі (Solid) інтактного колінного суглоба за КТ-сканами пацієнта [7–10]. Програмними засобами Mimics КТ-скани перетворені в полілінійні й засобами SolidWorks створено модель колінного суглоба. На наступному етапі модель експортована у програму ANSYS для проведення розрахунків НДС.

На рис. 1 зображений загальний вигляд тривимірної геометричної моделі колінного суглоба, яка включає 6 твердотільних елементів — проксимальний відділ великогомілкової кістки (рис. 2), дистальний відділ стегнової кістки (рис. 3), суглобовий хрящ медіального й латерального надвиростків стегнової кістки (рис. 4) та мениски (рис. 5).

В автоматичному режимі згенеровано скінченно-елементну сітку дискретної моделі, яка налічує 156 868 вузлів та 86 153 елементи (рис. 6). Схема навантаження моделі наведена на рис. 7. Перерахована маса тіла, що діє на колійний суглоб  $F=750$  Н (середньо-статистична вага тіла людини при одноопорному стоянні).

Здійснений аналіз НДС твердотільних елементів моделі, ефективності геометричних даних, адекватності моделі з виходом на етапи подальшого моделювання [11–15]. Значення модуля пружності та коефіцієнта Пуассона наведені в табл. 1 на с. 25.

На рис. 8 показано розподіл навантаження — зусилля, деформації та напруження, у колінному суглобі між інтактними менисками та хрящем —  $\sigma_{\max}=6,53$  МПа.

Надалі НДС оцінювався лише на більш клінічно важливих елементах біомеханічної моделі — надвиростках стегнової кістки, суглобовому хрящі медіального надвиростка стегна та медіальному мениску, які є найбільш

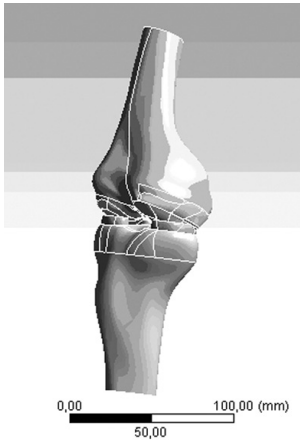


Рис. 1. Тривимірний твердотільний біомеханічний модель колінного суглоба (ANSYS)

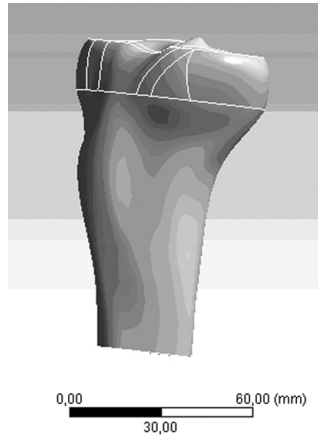


Рис. 2. Проксимальний відділ великогомілкової кістки

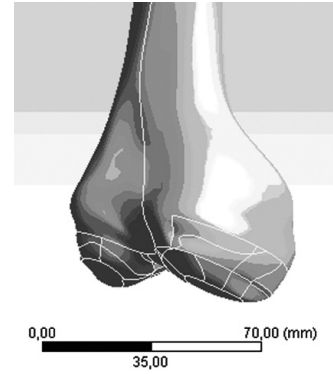


Рис. 3. Дистальний відділ стегнової кістки

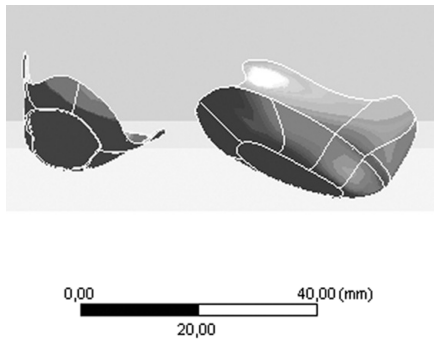


Рис. 4. Суглобовий хрящ медіального і латерального надвиростків стегнової кістки

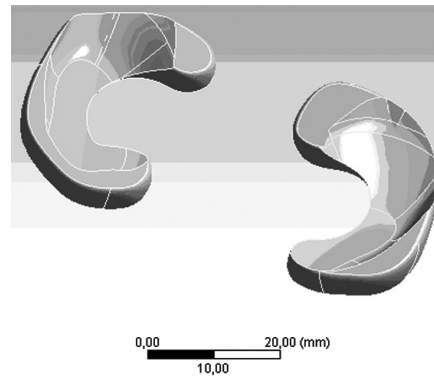


Рис. 5. Меніски

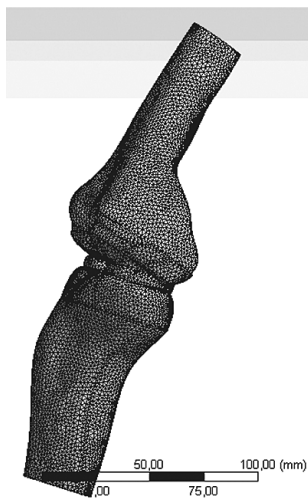


Рис. 6. Дискретна модель колінного суглоба

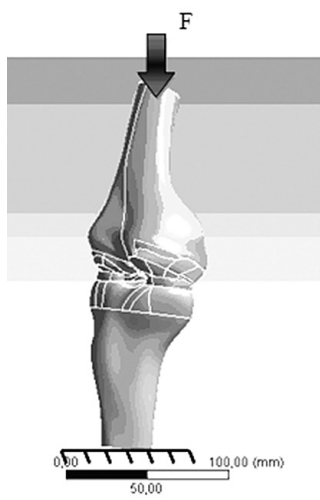


Рис. 7. Схема навантаження моделі колінного суглоба

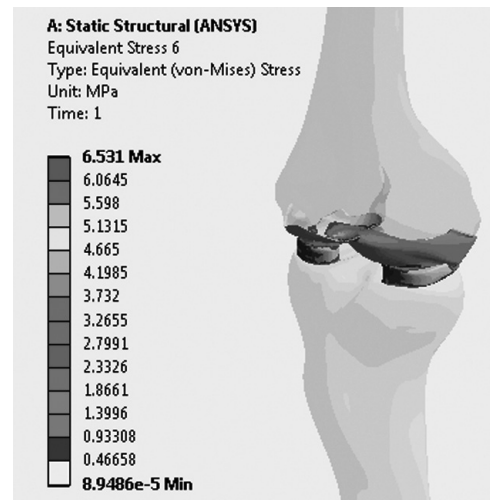


Рис. 8. Напруження на інтактних менісках і хрящі

Таблиця 1

**Механічні властивості кісткової та хрящової тканини**

Анатомічна структура	Модуль пружності, Е, Па	Коефіцієнт Пуассона, $\nu$
Кортикальний шар	$8 \times 10^9$	0,3
Спонгіозний шар	$8 \times 10^8$	0,35
Хрящ	$1,5 \times 10^7$	0,475

навантажуваними. Зміщення навантаження на медіальні структури колінного суглоба обумовлені особливостями проходження біомеханічної осі нижньої кінцівки зі зміщенням проекції центра ваги медіально.

Елементи біомеханічної моделі — стегнова кістка з хрящем (а) та суглобовий хрящ з дефектом різного діаметра на медіальному надвиростку (б), наведені на рис. 9–12.

Аналізу підлягали найбільш поширені клінічно значимі ушкодження медіального меніска, які за площею та локалізацією післяопераційного дефекту розподілені на 6 типів (рис. 13):

1 тип — дефект заднього рогу медіального меніска площею 25%;

2 тип — дефект заднього рогу медіального меніска площею 50%;

3 тип — дефект тіла та заднього рогу медіального меніска площею 50%;

4 тип — дефект тіла медіального меніска площею 50%;

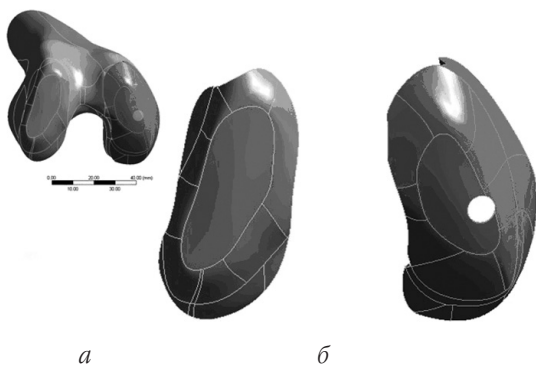
5 тип — тотальний дефект заднього рогу медіального меніска;

6 тип — тотальний дефект заднього рогу та тіла медіального меніска.

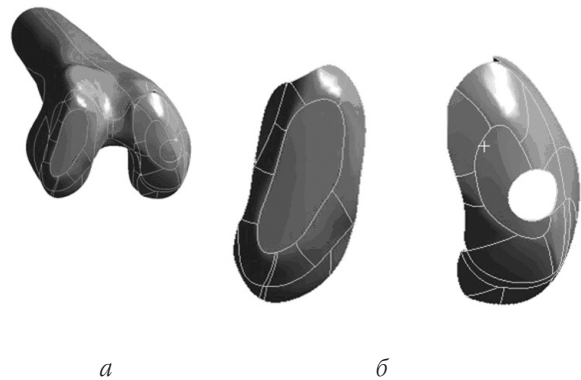
Дослідження змін напруження і деформації проведені в зоні дефекту суглобового хряща залежно від його діаметра та післяопераційного дефекту меніска при навантаженні на колінний суглоб однією вагою тіла (750 Н). Для порівняльного аналізу взяті значення максимальних напружень на інтактному медіальному меніску —  $\sigma_{\max} = 5,13$  МПа (задній ріг), та інтактному хрящі у медіальній зоні —  $\sigma_{\max} = 3,5$  МПа [1].

**Результати та їх обговорення**

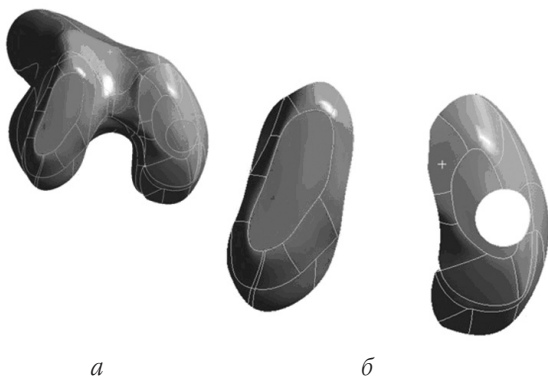
Результати дослідження НДС елементів біомеханічної моделі колінного суглоба — суглобовий хрящ медіального надвиростка стегна з різними розмірами дефекту (5, 10, 15, 20 мм) та медіальний меніск з 1 типом післяопераційного дефекту наведено на рис. 14–17 на с. 26–27.



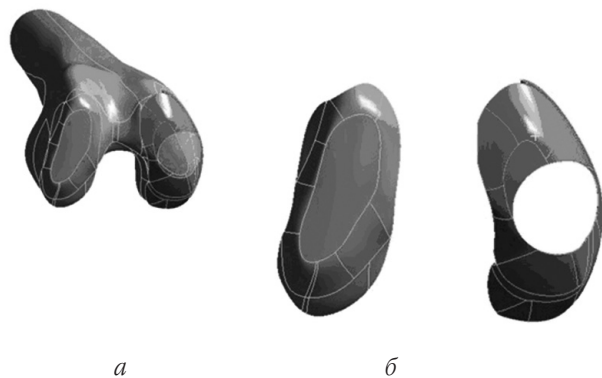
**Рис. 9.** Стегнова кістка з хрящем (а) та суглобовий хрящ з дефектом 5 мм (б)



**Рис. 10.** Стегнова кістка з хрящем (а) та суглобовий хрящ з дефектом 10 мм (б)



**Рис. 11.** Стегнова кістка з хрящем (а) та суглобовий хрящ з дефектом 15 мм (б)



**Рис. 12.** Стегнова кістка з хрящем (а) та суглобовий хрящ з дефектом 20 мм (б)

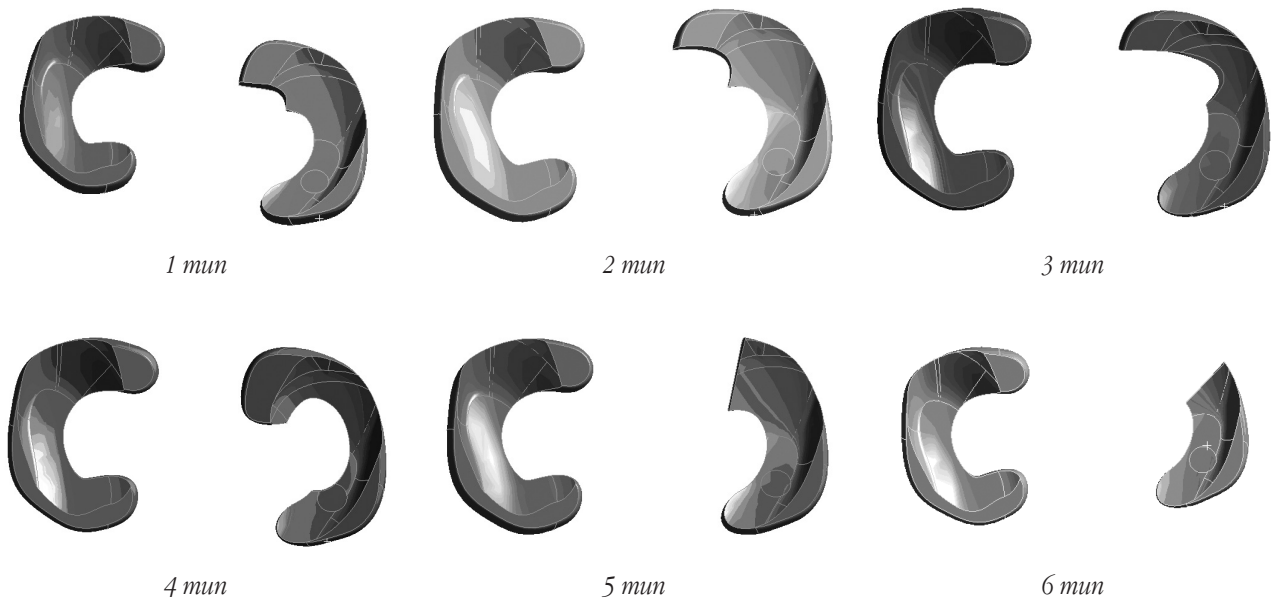


Рис. 13. Типи дефекту медіального меніска (твердотільні елементи біомеханічної моделі)

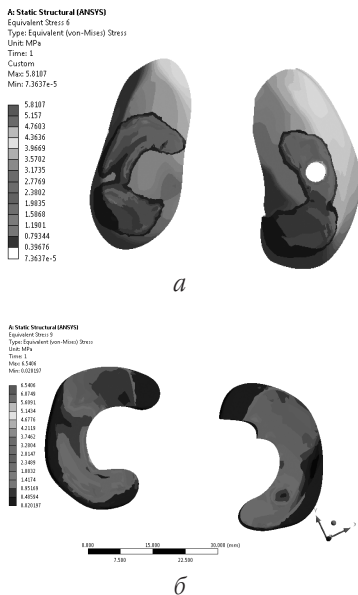


Рис. 14. Напруження на суглобовому хрящі (а) — дефект 5 мм,  $\sigma_{\max}=5,81$  МПа, та менісках (б) — дефект 1 типу,  $\sigma_{\max}=6,54$  МПа

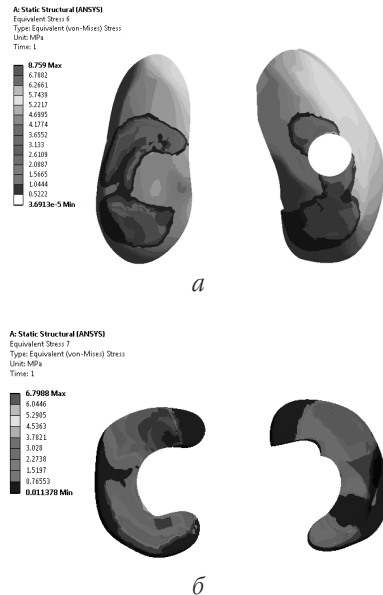


Рис. 15. Напруження на суглобовому хрящі (а) — дефект 10 мм,  $\sigma_{\max}=8,76$  МПа, та менісках (б) — дефект 1 типу,  $\sigma_{\max}=6,80$  МПа

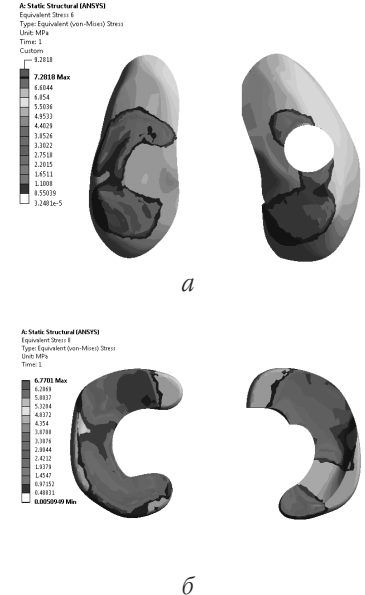


Рис. 16. Напруження на суглобовому хрящі (а) — дефект 15 мм,  $\sigma_{\max}=9,28$  МПа, та менісках (б) — дефект 1 типу,  $\sigma_{\max}=6,77$  МПа

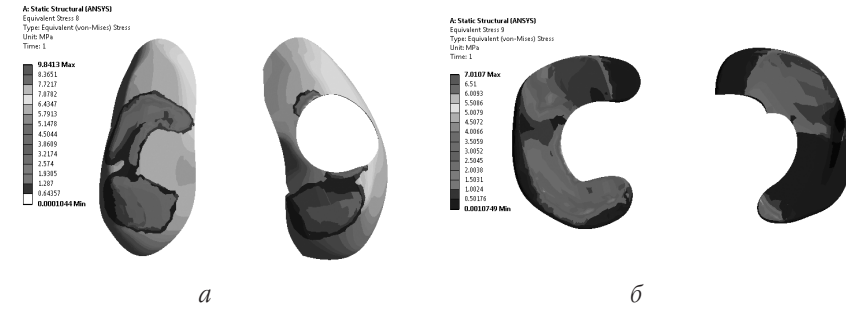
Результати дослідження НДС елементів біомеханічної моделі колінного суглоба — суглобовий хрящ медіального надвиростка стегна з різними розмірами дефекту (5, 10, 15, 20 мм) та медіальний меніск із 2 типом дефекту наведено на рис. 18–21.

Результати дослідження НДС елементів біомеханічної моделі колінного суглоба — суглобовий хрящ медіального надвиростка стегна з різними розмірами дефекту (5, 10, 15, 20 мм) та медіальний меніск із 3 типом дефекту наведено на рис. 22–25.

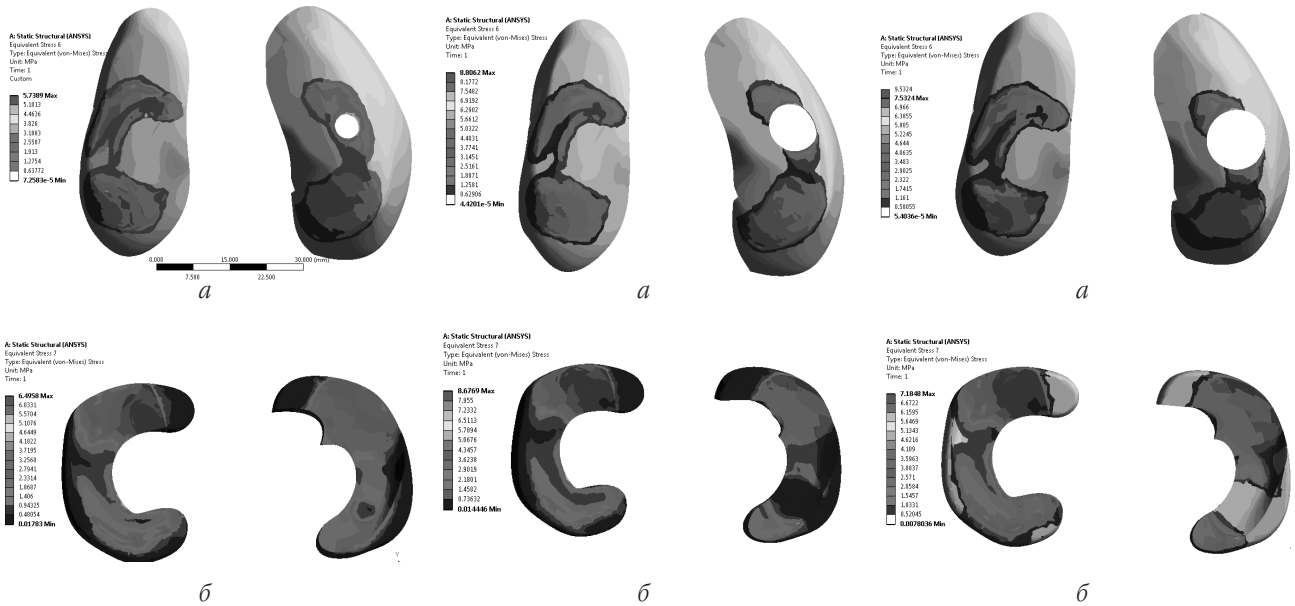
Результати дослідження НДС елементів біомеханічної моделі колінного суглоба — суглобовий хрящ медіального надвиростка стегна з різними розмірами дефекту (5, 10, 15, 20 мм) та медіальний меніск із 4 типом дефекту наведено на рис. 26–29 на с. 28.

Результати дослідження НДС елементів біомеханічної моделі колінного суглоба — суглобовий хрящ медіального надвиростка стегна з різними розмірами дефекту (5, 10, 15, 20 мм) та медіальний меніск з 5 типом дефекту наведено на рис. 30–33 на с. 28–29.

Результати дослідження НДС елементів біомеханічної моделі колінного суглоба — суглобовий хрящ медіального надвиростка стегна з різними розмірами дефекту (5, 10, 15, 20 мм) та медіальний меніск з 6 типом дефекту наведено на рис. 34–37 на с. 29.



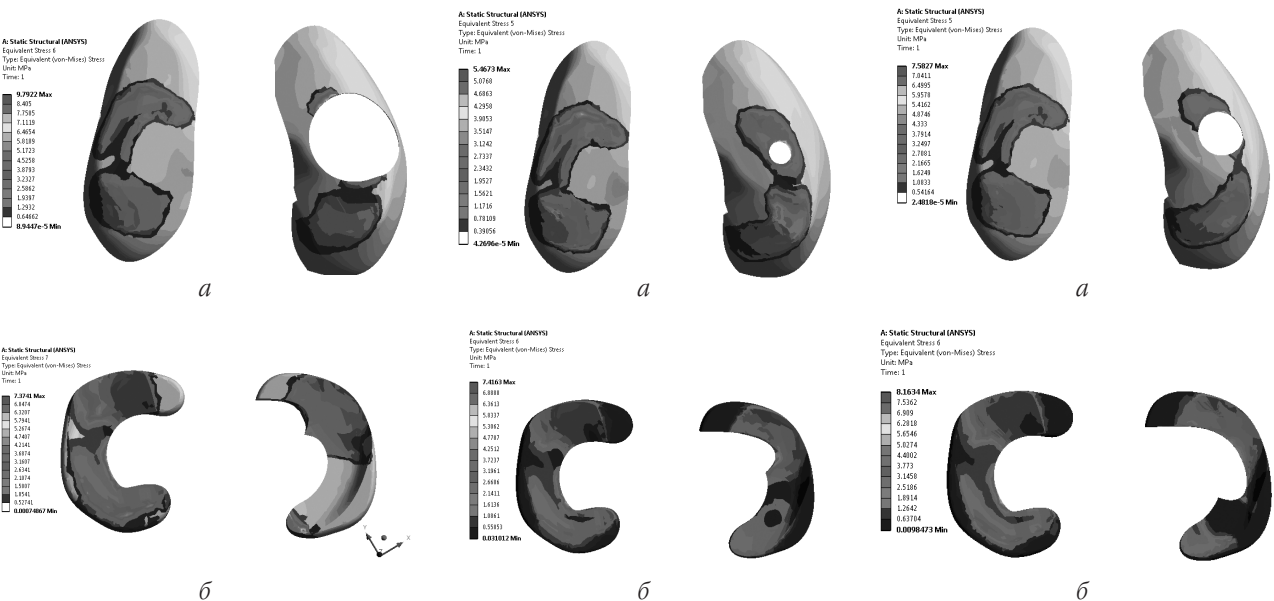
**Рис. 17.** Напруження на суглобовому хрящі (а) — дефект 20 мм,  $\sigma_{\max}=9,84$  МПа, та менісках (б) — дефект 1 *титу*,  $\sigma_{\max}=7,01$  МПа



**Рис. 18.** Напруження на суглобовому хрящі (а) — дефект 5 мм,  $\sigma_{\max}=5,73$  МПа, та менісках (б) — дефект 2 *титу*,  $\sigma_{\max}=6,50$  МПа

**Рис. 19.** Напруження на суглобовому хрящі (а) — дефект 10 мм,  $\sigma_{\max}=8,81$  МПа, та менісках (б) — дефект 2 *титу*,  $\sigma_{\max}=8,68$  МПа

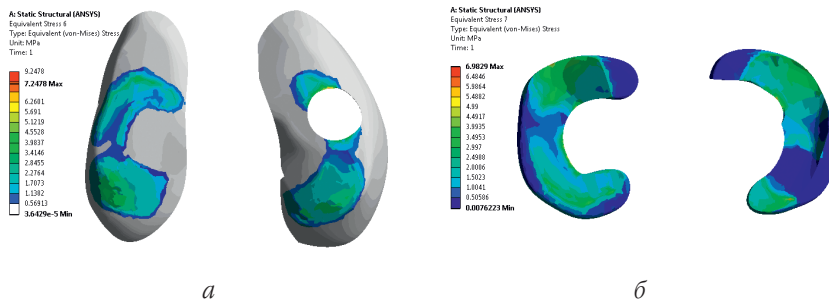
**Рис. 20.** Напруження на суглобовому хрящі (а) — дефект 15 мм,  $\sigma_{\max}=9,53$  МПа, та менісках (б) — дефект 2 *титу*,  $\sigma_{\max}=7,18$  МПа



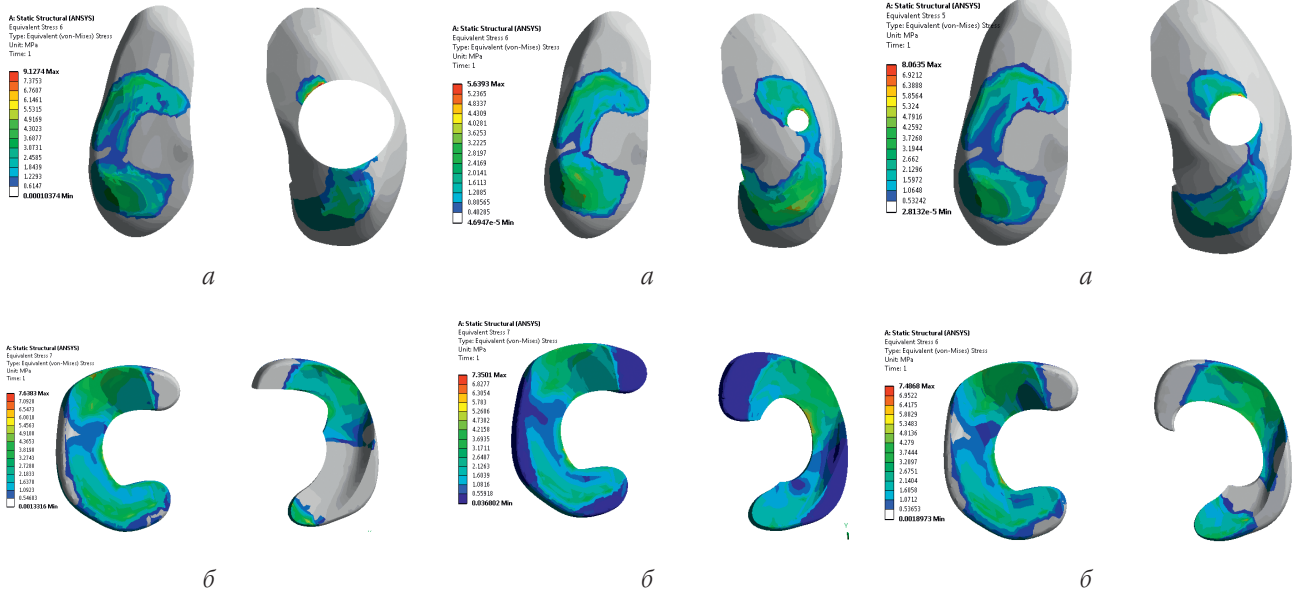
**Рис. 21.** Напруження на суглобовому хрящі (а) — дефект 20 мм,  $\sigma_{\max}=9,79$  МПа, та менісках (б) — дефект 2 *титу*,  $\sigma_{\max}=7,37$  МПа

**Рис. 22.** Напруження на суглобовому хрящі (а) — дефект 5 мм,  $\sigma_{\max}=5,47$  МПа, та менісках (б) — дефект 3 *титу*,  $\sigma_{\max}=7,42$  МПа

**Рис. 23.** Напруження на суглобовому хрящі (а) — дефект 10 мм,  $\sigma_{\max}=7,58$  МПа, та менісках (б) — дефект 3 *титу*,  $\sigma_{\max}=8,16$  МПа



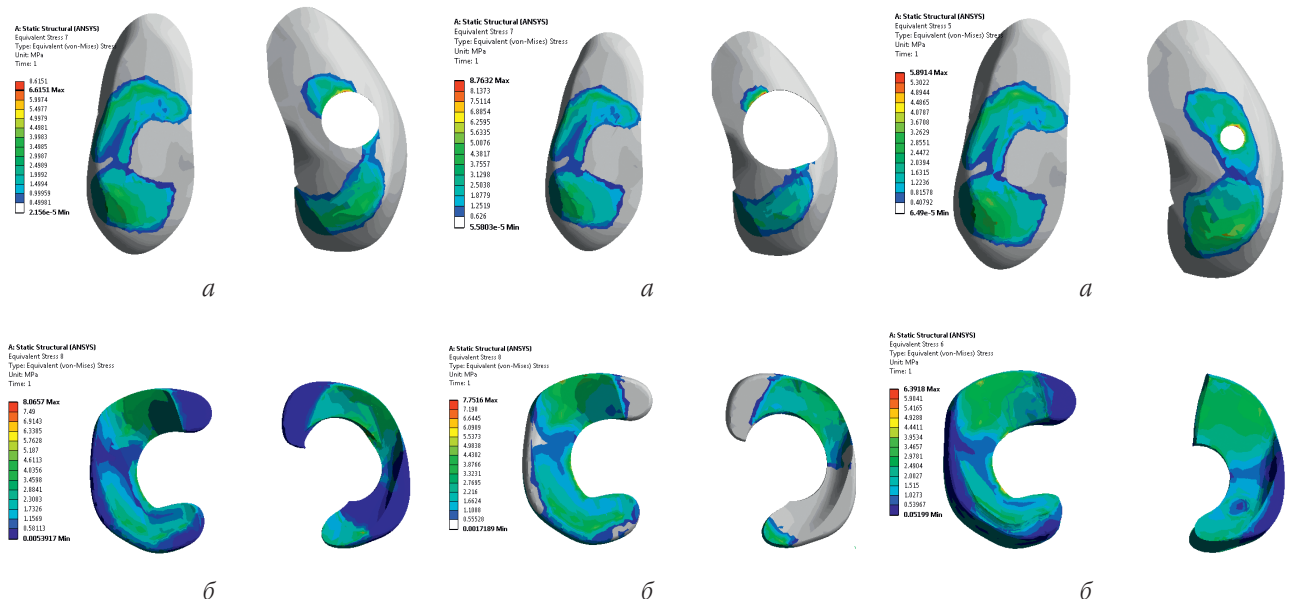
**Рис. 24.** Напруження на суглобовому хрящі (а) — дефект 15 мм,  $\sigma_{\max}=8,25$  МПа, та менісках (б) — дефект 3 *титу*,  $\sigma_{\max}=6,98$  МПа



**Рис. 25.** Напруження на суглобовому хрящі (а) — дефект 20 мм,  $\sigma_{\max}=9,13$  МПа, та менісках (б) — дефект 3 *титу*,  $\sigma_{\max}=7,64$  МПа

**Рис. 26.** Напруження на суглобовому хрящі (а) — дефект 5 мм,  $\sigma_{\max}=5,64$  МПа, та менісках (б) — дефект 4 *титу*,  $\sigma_{\max}=7,35$  МПа

**Рис. 27.** Напруження на суглобовому хрящі (а) — дефект 10 мм,  $\sigma_{\max}=8,06$  МПа, та менісках (б) — дефект 4 *титу*,  $\sigma_{\max}=7,49$  МПа



**Рис. 28.** Напруження на суглобовому хрящі (а) — дефект 15 мм,  $\sigma_{\max}=8,62$  МПа, та менісках (б) — дефект 4 *титу*,  $\sigma_{\max}=8,07$  МПа

**Рис. 29.** Напруження на суглобовому хрящі (а) — дефект 20 мм,  $\sigma_{\max}=8,76$  МПа, та менісках (б) — дефект 4 *титу*,  $\sigma_{\max}=7,75$  МПа

**Рис. 30.** Напруження на суглобовому хрящі (а) — дефект 5 мм,  $\sigma_{\max}=5,89$  МПа, та менісках (б) — дефект 5 *титу*,  $\sigma_{\max}=6,39$  МПа

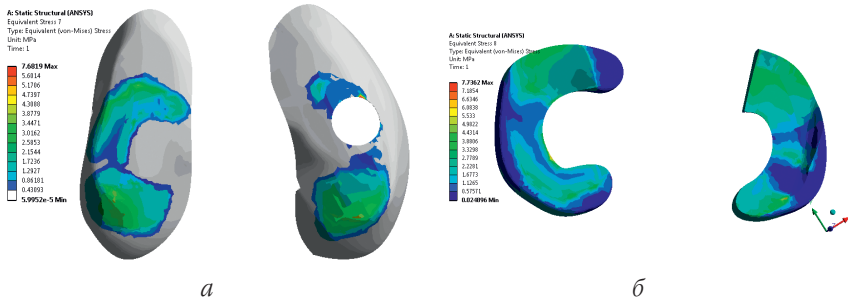


Рис. 31. Напруження на суглобовому хрящі (а) — дефект 10 мм,  $\sigma_{\max}=7,68$  МПа, та менісках (б) — дефект 5 *титу*,  $\sigma_{\max}=7,74$  МПа

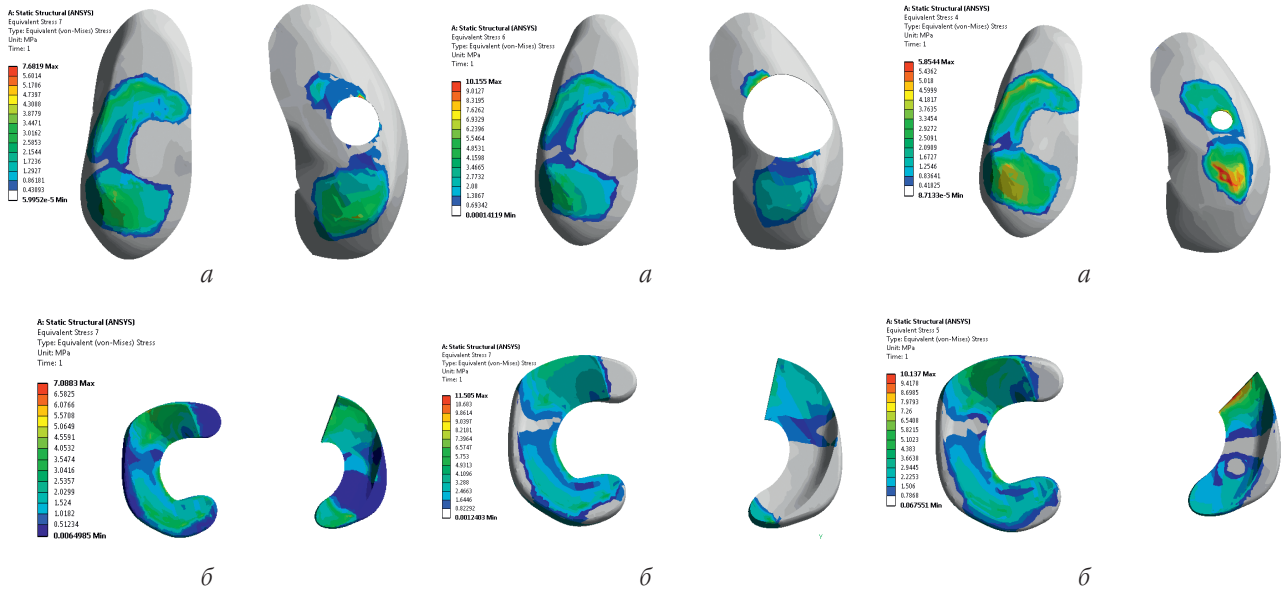


Рис. 32. Напруження на суглобовому хрящі (а) — дефект 15 мм,  $\sigma_{\max}=9,69$  МПа, та менісках (б) — дефект 5 *титу*,  $\sigma_{\max}=8,08$  МПа

Рис. 33. Напруження на суглобовому хрящі (а) — дефект 20 мм,  $\sigma_{\max}=10,16$  МПа, та менісках (б) — дефект 5 *титу*,  $\sigma_{\max}=11,51$  МПа

Рис. 34. Напруження на суглобовому хрящі (а) — дефект 5 мм,  $\sigma_{\max}=5,85$  МПа, та менісках (б) — дефект 6 *титу*,  $\sigma_{\max}=10,14$  МПа

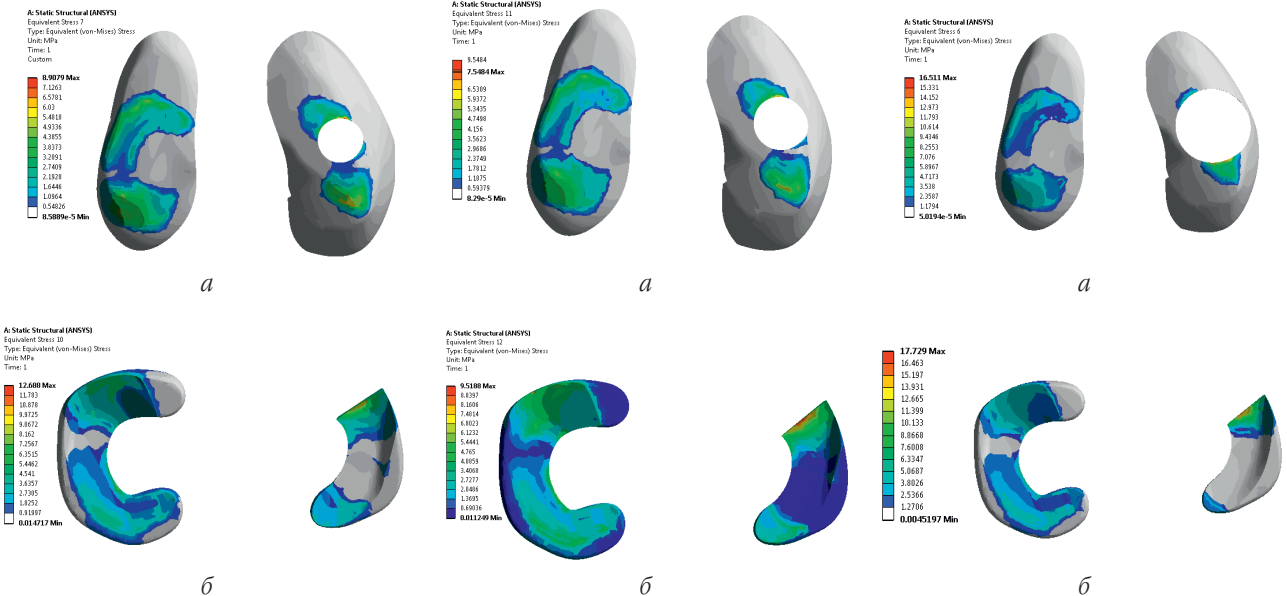


Рис. 35. Напруження на суглобовому хрящі (а) — дефект 10 мм,  $\sigma_{\max}=8,91$  МПа, та менісках (б) — дефект 6 *титу*,  $\sigma_{\max}=12,69$  МПа

Рис. 36. Напруження на суглобовому хрящі (а) — дефект 15 мм,  $\sigma_{\max}=9,55$  МПа, та менісках (б) — дефект 6 *титу*,  $\sigma_{\max}=14,52$  МПа

Рис. 37. Напруження на суглобовому хрящі (а) — дефект 20 мм,  $\sigma_{\max}=16,51$  МПа, та менісках (б) — дефект 6 *титу*,  $\sigma_{\max}=17,73$  МПа



Таблиця 2

**Напруження на суглобовому хрящі (MPa) залежно від діаметра його дефекту та типу дефекту меніска**

Дефект хряща, мм	Післяопераційний дефект меніска					
	1 тип	2 тип	3 тип	4 тип	5 тип	6 тип
5	5,81	5,73	5,47	5,64	5,89	5,85
10	8,76	8,81	7,58	8,06	7,68	8,91
15	9,28	9,53	8,25	8,62	9,69	9,55
20	9,84	9,79	9,13	8,76	10,16	16,51

З результатів досліджень видно, що у випадку поєднання дефекту хряща з дефектом меніска простежується зростання напружень на хрящі, що пов'язане зі зменшенням площі контакту та площі розподілу навантаження на контактних ділянках. Показники напруження на суглобовому хрящі та меніску збільшуються залежно від діаметра дефекту хряща та типу дефекту меніска (табл. 2). Концентрація напружень відбувається по краю дефекту суглобового хряща, тим самим прискорюючи терміни його руйнування.

На підставі наведених вище даних побудований графік залежності напружень на суглобовому хрящі від діаметра його дефекту для кожного типу дефекту меніска (рис. 38).

Як видно з графіка на рис. 38, при збільшенні розміру дефекта хряща з 5 до 20 мм напруження на хрящі збільшуються від 55,3% при 4 типі післяопераційного дефекту меніска, до 182,2% при 6 типі дефекту меніска.

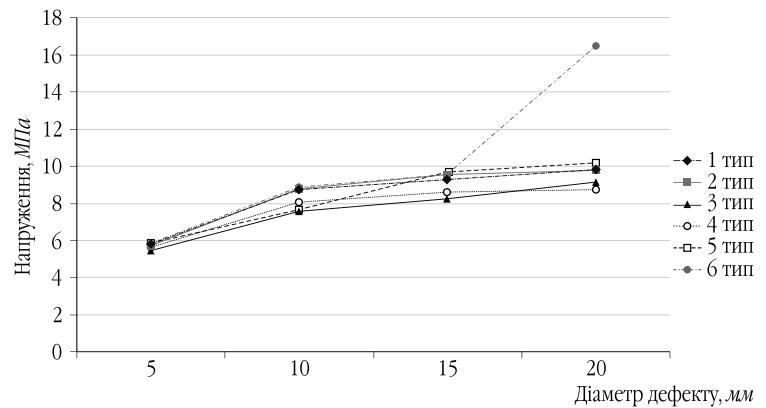
Напруження на медіальному меніску (MPa) залежно від типу його дефекту та діаметра дефекту суглобового хряща наведені в табл. 3.

Зміни навантаження на медіальний меніск для кожного типу його дефекту, залежно від розміру дефекту суглобового хряща наведено на графіку рис. 39. При збільшенні розміру дефекту хряща з 5 до 20 мм напруження на меніску збільшуються від 3% при 3 типі його післяопераційного дефекту, до 80,1% при 5 типі дефекту меніска.

За результатами дослідження найбільші напруження з'являються в тих випадках, коли зони дефекту меніска та дефекту суглобового хряща перетинаються. Цей факт найбільш показово простежується на прикладі 6 типу дефекту меніска в поєднанні з дефектом хряща 20 мм. З'являються ділянки концентрації напружень як на суглобовому хрящі (див. рис. 38), так і на меніску (див. рис. 39).

**Висновки**

В умовах поєднаних ушкоджень суглобового хряща та післяопераційного дефекту меніска при збільшенні розміру дефекту хряща з 5 до 20 мм напруження на хрящі збільшуються від 55,3%, при післяопераційному дефекті тіла медіального меніска площею 50% дефекту меніска, до 182,2% при тотальному дефекті заднього рогу та тіла медіального меніска, відносно показників НДС інтактного хряща ( $\sigma_{max}=3,5MPa$ ). Напруження на медіальному меніску збільшуються від 3% при дефекті тіла та заднього рогу медіального меніска площею 50% до 80,1% при тотальному дефекті заднього рогу

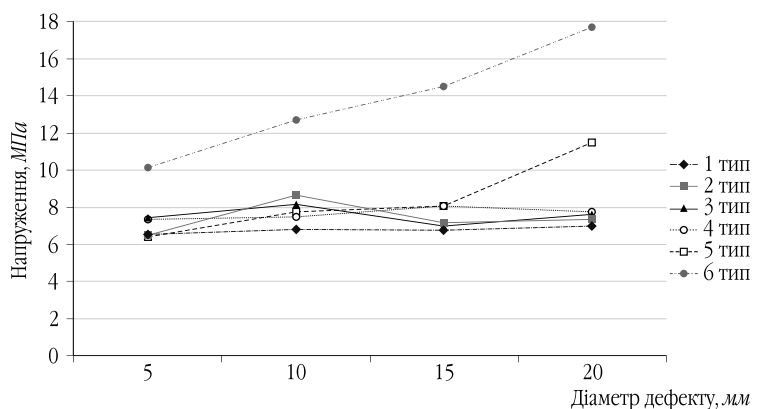


**Рис. 38.** Графік залежності напружень на суглобовому хрящі від діаметру його дефекту для кожного типу ушкодження меніска

Таблиця 3

**Напруження на медіальному меніску (MPa) залежно від типу його дефекта та діаметру дефекта суглобового хряща**

Дефект хряща, мм	Післяопераційний дефект меніска					
	1 тип	2 тип	3 тип	4 тип	5 тип	6 тип
5	6,54	6,5	7,42	7,35	6,39	10,14
10	6,8	8,68	8,16	7,49	7,74	12,69
15	6,77	7,18	6,98	8,07	8,08	14,52
20	7,01	7,37	7,64	7,75	11,51	17,73



**Рис. 39.** Графік залежності напружень на медіальному меніску від діаметру дефекту суглобового хряща

медіального меніску відносно показників НДС інтактного меніска ( $\sigma_{\max} = 5,13$  МПа).

Наявність дефектів суглобового хряща медіального надвиростка стегнової кістки збільшує напруження в колінному суглобі. У поєднанні з дефектом медіального меніска в умовах рухів у колінному суглобі при навантаженні однією вагою тіла рівень напружень на суглобовому хрящі значно збільшується, здійснюючи руйнуючий вплив і тим самим прискорюючи прогресування артрозних явищ, особливо у випадках коли зони дефекту меніска та дефекту суглобового хряща перетинаються.

Проведені розрахунки націлюють хірурга на визначення тактики хірургічного втручання, спрямованої на розвантаження ушкодженої ділянки [16–18].

## Література

1. Анкін М.Л. Тактика лікування травматичних ушкоджень суглобового хряща колінного суглоба / М.Л. Анкін, О.А. Костогряз // Вісн. ортопед., травматол. та протезув. — 2007. — № 3. — С. 14–18.
2. Барлам Д.М. Решение контактной задачи теории упругости методом конечных элементов // Пробл. прочности. — 1983. — № 4. — С. 39–43.
3. Басов К.А. ANSYS в примерах и задачах / Под общ. ред. Д.Г. Красковского. — М.: Компьютер Пресс, 2002. — 224 с.
4. Батэ Н. Численные методы анализа и метод конечных элементов / Н. Батэ, Е. Вилсон. — М.: Стройиздат, 1982. — 447 с.
5. Блох М.В. О модификации метода конечных элементов для решения упругих и пластических контактных задач / М.В. Блох, А.В. Оробинский // Пробл. прочности. — 1983. — № 5. — С. 21–27.
6. Ильюшин А.А. Механика сплошной среды / А.А. Ильюшин. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1990. — 312 с.
7. Образцов И.Ф. Проблемы прочности в биомеханике / Образцов И.Ф., Адамович И.С., Барер А.С. — М.: Высшая шк., 1988. — 311 с.
8. Победря Б.Е. Основы механики сплошной среды : курс лекций / Б.Е. Победря, Д.В. Георгиевский. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. — 272 с.
9. Распределение контактного давления в тибно-фemorальной зоне в условиях дефекта суставного хряща / Страфун С.С., Лазарев И.А., Костогряз О.А. [и др.] // Травма. — 2011. — № 3. — С. 85–92.
10. Цыбенко А.С. Автоматизированная система обслуживания конечно-элементных расчетов. / Цыбенко А.С., Ващенко Н.Г., Кришук Н.Г., Лавендел Ю.О. — К.: Вища шк. — 1986. — 251 с.
11. Чигарев А.В. ANSYS для инженеров : Справ. пособие / Чигарев А.В., Кравчук А.С., Смалюк А.Ф. — М.: Машиностроение-1, 2004. — 512 с.
12. Ahmed A.M. In vitro measurement of static pressure distribution in synovial joints. — Part 1, Part 2. / Ahmed A.M., Burke D.L., Yu A.J. // Biomech. Engin. — 1983. — Vol. 105. — P. 216–236.
13. Buckwalter J.A. Articular cartilage : II. Degeneration and osteoarthritis, repair, regeneration and transplantation / J.A. Buckwalter, H.J. Mankin // J. Bone Jt. Surg. — 1997. — Vol. 79-A. — P. 612–632.
14. DeMarco A.L. Measuring contact pressure and contact area in Orthopaedic Applications : Fuji Film vs. TecScan. Poster session / DeMarco A.L., Rust D.A., Bacbus K.N. / FL46 Annual meeting, Orth. Research Soc. (March 12–15, 2000). — Orlando, Florida, 2000. — P. 0518.
15. Effect of osteochondral defects on articular cartilage / Nelson B.H., Anderson D.D., Brand R.A., Brown T.D. // Acta Orthop. Scand. — 1988. — Vol. 59, № 5. — P. 574–579.
16. High tibial osteotomy for unloading osteochondral defects in the medial compartment of the knee / Mina C., Garrett W.E. Jr, Pietrobon R. [et al.] // Am.J. Sports Med. — 2008. — Vol. 36, № 5. — P. 949–955.
17. The biological effect of continuous passive motion on the healing of full thickness defects in articular cartilage. An experimental investigation in the rabbit / Salter R.B., Simmonds D.F., Malcolm B.W. [et al.] // J. Bone Joint Surg. — 1980. — Vol. 62, № 8. — P. 1232–1251.
18. Tibiofemoral Contact Mechanics After Serial Medial Meniscectomies in the Human Cadaveric Knee / Lee S.J., Aadalen K.J., Malaviya P. [et al.] // Am.J. Sports Med. — 2006. — Vol. 34, № 8. — P. 1334–1344.

УДК 616.72-001.5-031.25.001.33.616.718.56

## КЛАСИФІКАЦІЯ ВНУТРІШНЬОСУГЛОБОВИХ ПЕРЕЛОМІВ ПРОКСИМАЛЬНОГО ЕПІМЕТАФІЗА ВЕЛИКОГОМІЛКОВОЇ КІСТКИ

О. А. Бур'янов, Ю. Л. Соболевський, В. П. Кваша, Є. О. Скобенко, М. О. Задніченко  
Національний медичний університет імені О. О. Богомольця, м. Київ, Україна

### CLASSIFICATION OF INTRA-ARTICULAR FRACTURES OF PROXIMAL EPIMETAPHYSIS OF TIBIA

O. A. Buryanov, Yu. L. Sobolewski, V. P. Kvasha, E. O. Skobenko, M. O. Zadnichenko

The analysis of own experience and literary data of existent classification of fractures of tibia proximal epimetaphysis has been presented. It has been determined their importance taking into account concomitant lesions of cartilage, the structures of soft tissues of knee joint with the aim of objective diagnosis and standardization of treatment results with fractures of tibia proximal epimetaphysis. Generalized classification of lesions of the present area has been suggested.

Key words: fracture, proximal epimetaphysis of tibia, surgical treatment, arthroscopic technique.