

## **БИОМЕХАНИЧНИЙ АНАЛІЗ НАВАНТАЖЕННЯ СТРУКТУР КОЛІННОГО СУГЛОБА ПРИ РІЗНИХ ВАРІАНТАХ КОРЕКЦІЇ ВАРУСНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ ГОМІЛКИ У ПАЦІЄНТІВ З ХВОРОБОЮ БЛАУНТА**

*М. В. Скибан, Є. Л. Голюк, М. С. Кабацій, М. М. Немеш, О. М. Максимішин  
ДУ "Інститут травматології та ортопедії НАМН України", м. Київ*

### **THE BIOMECHANICS ANALYSIS OF LOADING OF STRUCTURES OF KNEE-JOINT AT THE DIFFERENT VARIANTS OF CORRECTION OF VARUS DEFORMATION OF SHIN FOR PATIENTS WITH ILLNESS OF BLOUNT**

*M. V. Skiban, Ye. L. Holyuk, M. S. Kabatsiy, M. M. Nemes, O. M. Maksymyshyn*

*At the conducted biomechanics analysis of loading of structures of knee-joint at the different variants of correction of varus deformation of shin for patients it is set with illness of Blount, that optimum from positions of biomechanics is the normal correction of deformations. It is possible to consider a hypercorrection possible variants to 10°, as at its large indexes of loading on external condyles of femoral and tibial bones practically twice exceeds loading on entocondyles.*

*Key words: knee joint, Blount disease, tibia vara correction.*

### **БИОМЕХАНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ НАГРУЗКИ СТРУКТУР КОЛЕННОГО СУСТАВА ПРИ РАЗНЫХ ВАРИАНТАХ КОРРЕКЦИИ ВАРУСНОЙ ДЕФОРМАЦИИ ГОЛЕНИ У ПАЦИЕНТОВ С БОЛЕЗНЬЮ БЛАУНТА**

*М. В. Скибан, Є. Л. Голюк, М. С. Кабацій, М. М. Немеш, О. М. Максимішин*

*При проведенном биомеханическом анализе нагрузки структур коленного сустава при разных вариантах коррекции варусной деформации голени у пациентов с болезнью Блаунта установлено, что оптимальной с позиций биомеханики является нормокоррекция деформации. Допустимыми вариантами можно считать гиперкоррекцию до 10°, поскольку при больших ее показателях нагрузка на внешние мышцы бедренной и большеберцовой костей практически вдвое превышают нагрузку на внутренние мышцы.*

*Ключевые слова: коленный сустав, болезнь Блаунта, коррекция варусной деформации.*

Хвороба Ерлахера-Блаунта характеризується варусною деформацією проксимального відділу великогомілкової кістки та внутрішньою торсією гомілки, що виникають унаслідок порушення функціонування медіальної частини проксимальної зони росту великогомілкової кістки [1–2]. До сьогодні найпоширенішим методом оперативного лікування деформації гомілки при цьому захворюванні у дітей старше 3-х років залишаються різноманітні варіанти корекційних остеотомій проксимального відділу великогомілкової кістки [3–5]. Одним із найбільш актуальних питань в оперативному лікуванні деформації гомілки при хворобі Ерлахера-Блаунта при їх застосуванні є визначення ступеня корекції варусної деформації у пацієнтів із зонами росту, які функціонують, оскільки профілактика рецидивів деформації у цьому випадку є провідним завданням хірурга.

Більшість авторів для визначення ступеня корекції деформації за допомогою остеотомії проксимального відділу великогомілкової кістки рекомендують враховувати стадію захворювання, ступінь деформації та вік (скелетну зрілість) пацієнта [6–7].

У відділі захворювань суглобів у дітей і підлітків для корекції деформації гомілки при хворобі Блаунта найчастіше застосовується жолобкова остеотомія за В.С. Шаргородським [8]. При аналізі результатів лікування 110 пацієнтів (178 гомілок) віком від 4 до 15 років, яким виконувалося дане оперативне втручання, у 24,6% хворих у подальшому відзначали рецидив деформації.

Так, В.С. Шаргородський рекомендує для запобігання рецидивам деформації у пацієнтів із зонами росту, які функціонують, виконувати гіперкоррекцію до 10–20° вальгусного відхилення [8].

Водночас у літературних джерелах немає даних про вплив ступеня корекції на структури колінного суглоба, а саме на їх напружено-деформований стан, оскільки зростання напружень в умовах динамічного навантаження (зокрема при ході в повсякденному житті) може сприяти швидкому прогресуванню дегенеративних змін у структурах колінного суглоба [9].

Таким чином, метою нашого дослідження стало встановлення оптимальних показників корекції механічної осі

Таблиця 1

**Максимальні напруження на структури колінного суглоба в усіх розрахункових моделях, МПа**

Назва розрахункового режиму	Розрахунковий режим	Гомілкво кістка		Гомілкові хрящі		Меніски		Стегнова кістка	
		Зовн.	Внутр.	Зовн.	Внутр.	Зовн.	Внутр.	Зовн.	Внутр.
до операції	1	0,55	0,90	0,52	0,90	1,35	1,43	0,78	0,50
нормокорекція	2	0,60	0,66	0,52	0,66	1,36	1,41	0,71	0,68
гіперкорекція 5°	3	0,74	0,54	0,53	0,54	1,39	1,42	0,85	0,56
гіперкорекція 10°	4	0,81	0,50	0,53	0,48	1,45	1,43	0,95	0,50
гіперкорекція 15°	5	0,90	0,47	0,56	0,42	1,54	1,43	1,08	0,49

нижньої кінцівки при хворобі Ерлахера-Блаунта за допомогою жолобкової остеотомії кісток гомілки на основі аналізу напружено-деформованого стану структур колінного суглоба при різному ступені корекції для профілактики подальших дегенеративних змін в умовах динамічного навантаження.

**Матеріали і методи**

За допомогою програмного пакету Mimics в автоматичному та напівавтоматичному режимах відтворена просторова геометрія колінного суглоба та засобами SolidWorks створено імітаційні комп'ютерні 3D-моделі для різних ступенів корекції варусної деформації гомілки при хворобі Блаунта (рис. 1).

Модель експортована у програму ANSYS для проведення розрахунків напружено-деформованого стану (НДС). Застосовували метод скінченних елементів (СЕ). Було визначено в'язко-пружні механічні властивості (ізотропні), контактний зв'язок між усіма елементами біомеханічної конструкції та задано початкові та граничні умови.

В напівавтоматичному режимі згенеровано скінченно-елементну сітку для обох моделей, яка налічувала 154 836 вузлів, 85 849 елементів. Для більш точних розрахунків сітка в ділянках контактів згущена (рис. 2).

Ключовими показниками для проведення порівняльного аналізу обрано значення інтенсивності напружень за Мізісом [10].

Оскільки межі міцності кістки індивідуально варіюють, нами консервативно прийнято порогове значення напружень для кортикального (твердого шару) 10–25 МПа, для губчастого шару – 3,5–4,5 МПа [10]. Схема закріплення та навантаження наведена на рис. 3. В якості навантаження моделі прийнято дію перерахованої маси тіла F=250 Н.

**Результати та їх обговорення**

Біомеханічний аналіз напружень елементів моделі до операції (перша розрахункова модель).

Результати розрахунків НДС для моделі до операції представлені на рис. 4. На рисунках проставлені маркерами значення напружень у різних ділянках розрахункової моделі.

Як бачимо з рис. 4, напруження на внутрішньому виростку при даному варіанті вдвічі більші відносно зовнішнього.

Біомеханічний аналіз навантажень моделі з корекцією початкової деформації 10° – нормокорекція (друга розрахункова модель).

На рис. 5 представлено результати розрахунків напружень на структури колінного суглоба після корекції варусної

деформації в 10° – нормокорекція деформації.

Як бачимо, напруження на виростках великогомілкової кістки майже вирівнялися, а саме: на внутрішньому зменшилися з 0,887 МПа до 0,659 МПа; на зовнішньому збільшилися з 0,548 МПа до 0,597 МПа.

Біомеханічний аналіз напружень моделі з корекцією початкової деформації 15° – гіперкорекція 5° (третя розрахункова модель).

На рис. 6 показано результати розрахунків навантажень на структури колінного суглоба при гіперкорекції варусної деформації 5°.

Відзначаємо зростання напружень на зовнішньому виростку: на внутрішньому виростку напруження зменшилися з 0,887 МПа до 0,542 МПа, на зовнішньому – збільшилися з 0,548 МПа до 0,737 МПа.

Біомеханічний аналіз напружень моделі з остеотомією 20° – гіперкорекція 10° (четверта розрахункова модель).

На рис. 7 показано результати розрахунків напружень на структурах колінного суглоба при гіперкорекції варусної деформації 10°.

Спостерігаємо зростання напруження на зовнішньому виростку майже удвічі порівняно з внутрішнім: на внутрішньому напруження зменшилися з 0,887 МПа до 0,504 МПа, на зовнішньому збільшилися з 0,548 МПа до 0,806 МПа.

Біомеханічний аналіз напружень моделі з корекцією початкової деформації на 25° – гіперкорекція 15° (п'ята розрахункова модель).

На рис. 8 показано результати розрахунків напружень на структури колінного суглоба при остеотомії з гіперкорекцією 15°.

Напруження на зовнішній виросток зросло ще більше: на внутрішньому зменшилися з 0,887 МПа до 0,468 МПа, на зовнішньому збільшилися з 0,548 МПа до 0,898 МПа.

В табл. 1 представлені максимальні напруження на структури колінного суглоба в усіх розрахункових моделях..

Представимо результати зміни напруження на стегновій кістці на внутрішньому та зовнішньому виростках залежно від кута корекції в графічному вигляді (рис. 9–12).

В табл. 2 представлено показники напруження виростків великогомілкової та стегнової кісток.

Таблиця 2

**Показники напруження внутрішніх і зовнішніх виростків великогомілкової та стегнової кісток, %**

Розрахунковий режим	Гомілкво кістка		Стегнова кістка	
	зовнішній	внутрішній	зовнішній	внутрішній
1	100,0	100,0	100,0	100,0
2	108,94	74,30	91,65	136,06
3	134,49	61,10	109,77	112,15
4	147,08	56,82	122,37	100,0
5	163,87	52,76	139,36	96,81

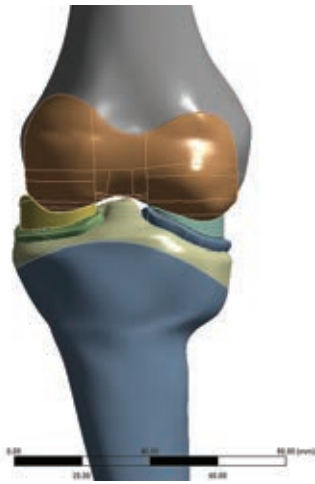


Рис. 1. Модель колінного суглоба пацієнта з хворобою Блаунта



Рис. 2. Скінчено-елементна розрахункова модель колінного суглоба пацієнта з варусною деформацією гомілки при хворобі Блаунта

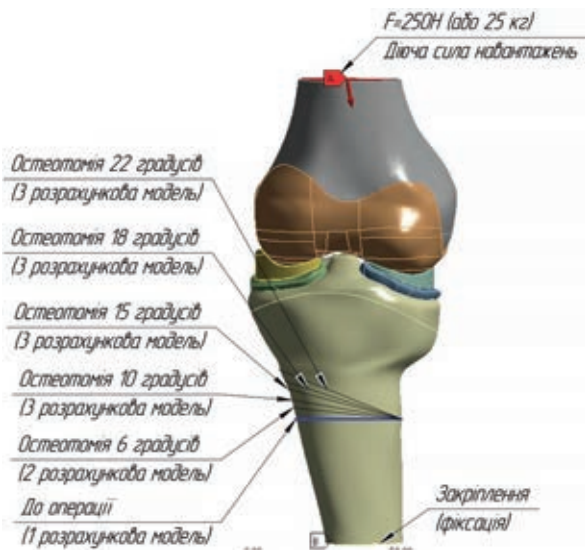


Рис. 3. Розрахункові схеми напружень на структури колінного суглоба до операції та при різних ступенях корекції варусної деформації у пацієнта з хворобою Блаунта

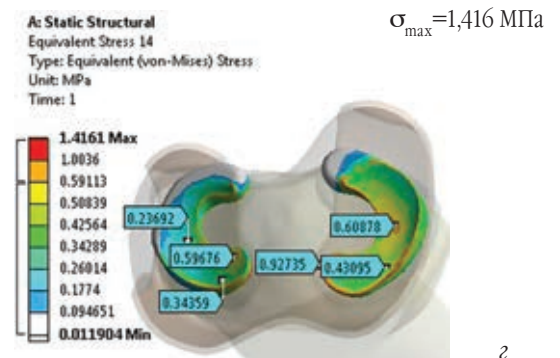
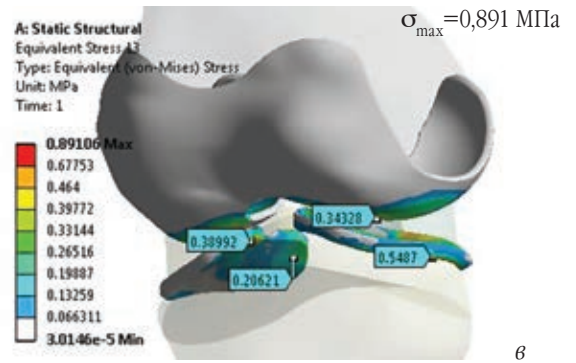
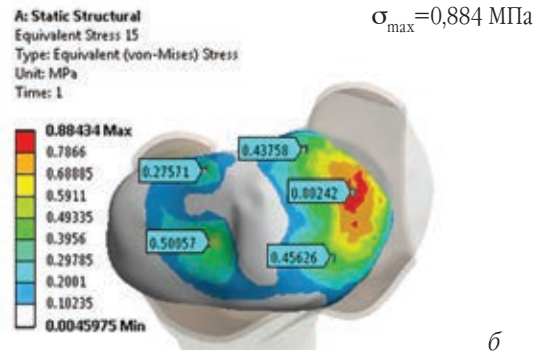
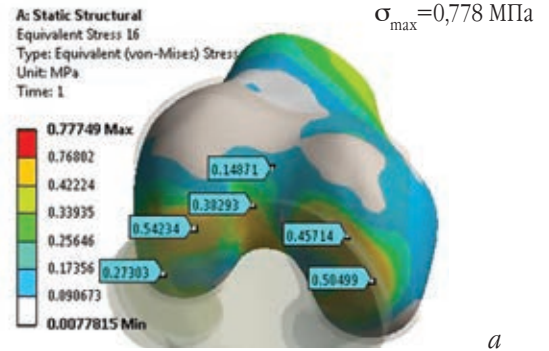
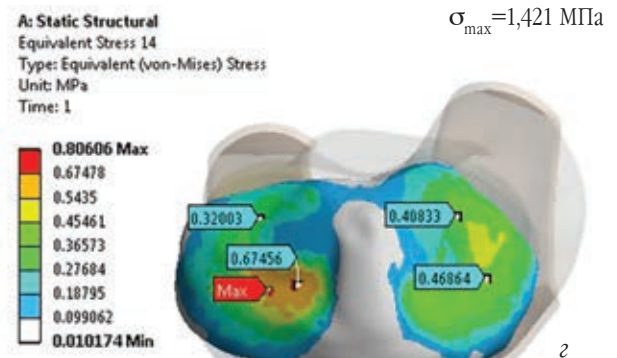
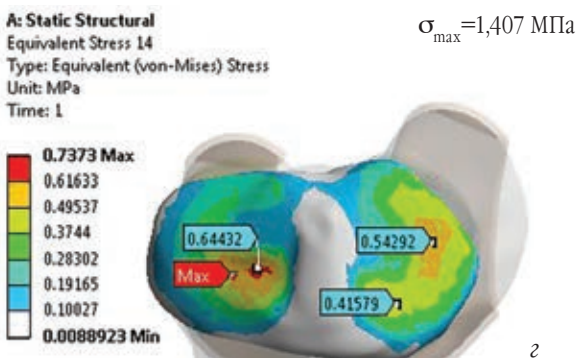
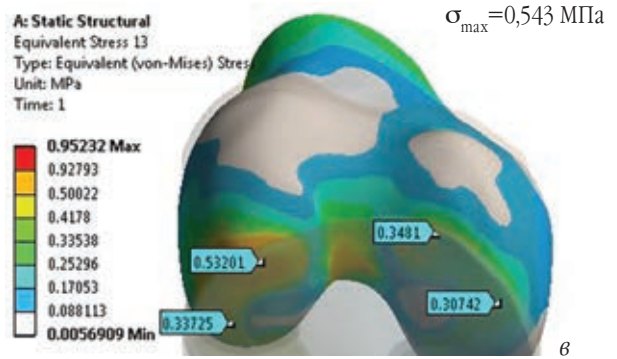
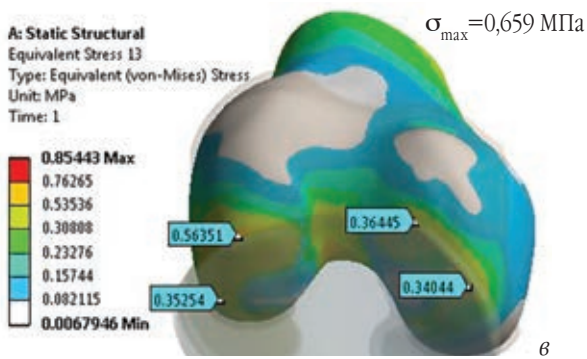
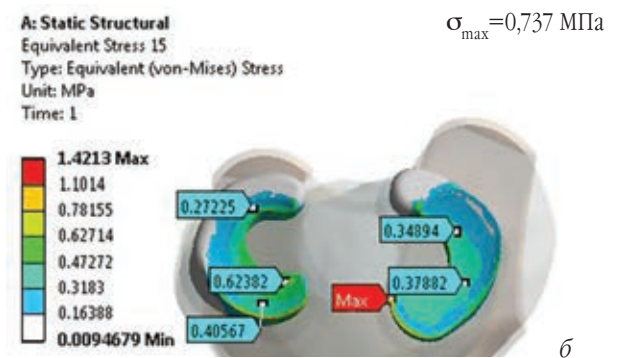
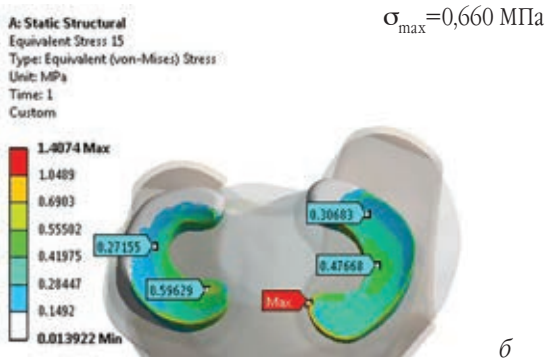
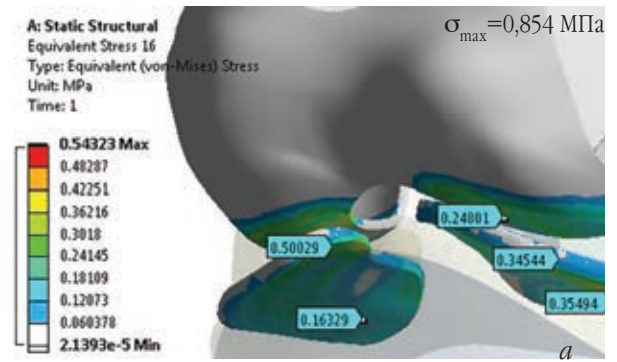
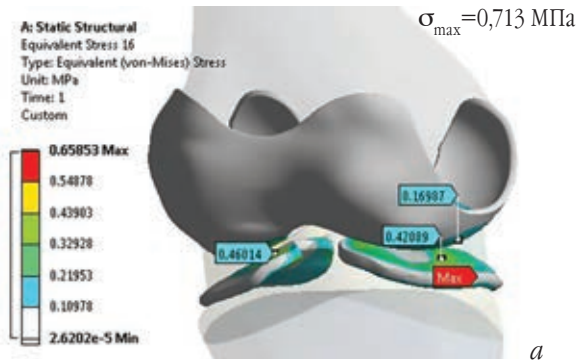


Рис. 4. Напруження на елементах моделі колінного суглоба до операції: а – виростки стегнової кістки; б – виростки великогомілкової кістки; в – суглобовий хрящ стегнової кістки; z – меніски

Як бачимо з графіків на рис. 9–12, оптимальне напруження на виростки великогомілкової та стегнової кісток відзначається при відновленні механічної осі нижньої кінцівки (нормокорекція). Допустиме напруження на суглобовому хрящі стегнової кістки та менісках відзначається при гіперкорекції деформації гомілки від 5° до 10° вальгусного відхилення.



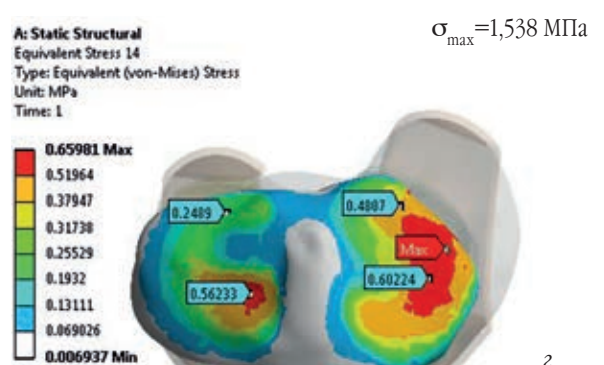
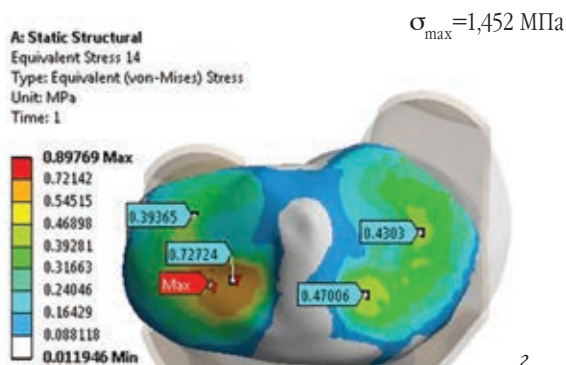
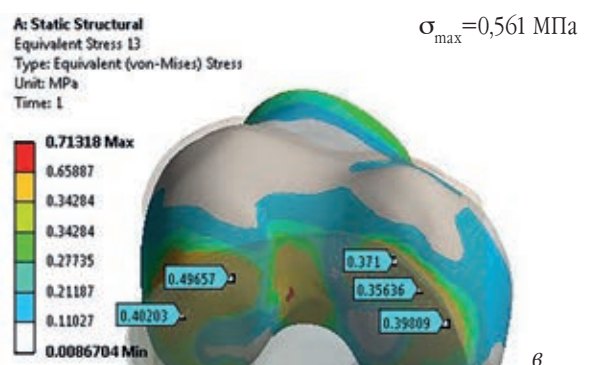
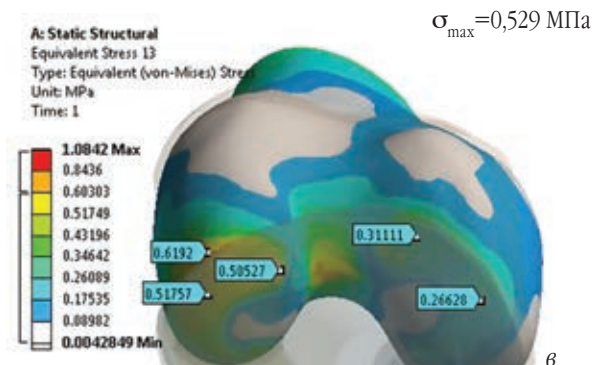
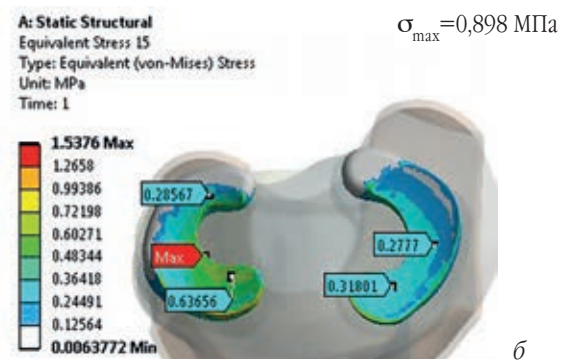
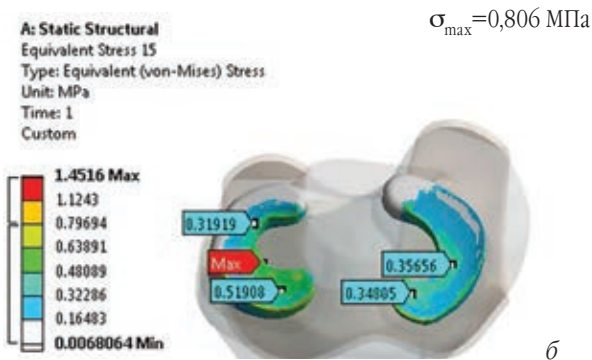
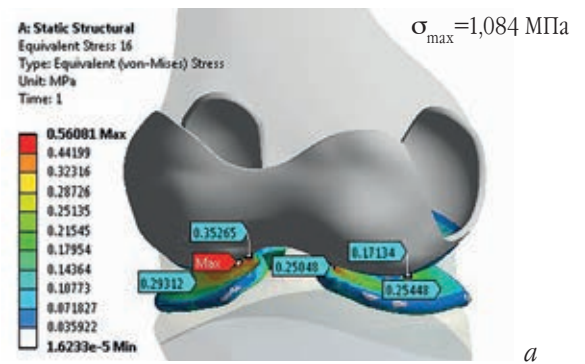
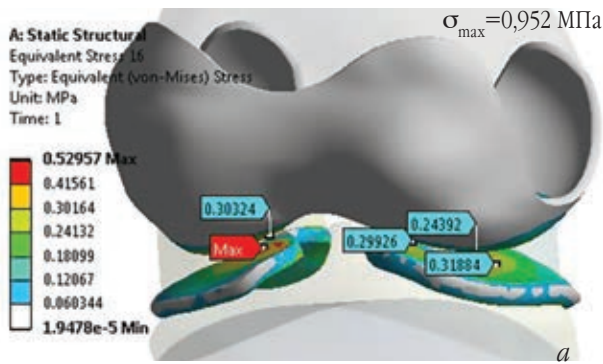
**Рис. 5.** Напруження на елементах моделі при корекції початкової деформації 10° – нормокорекція: *a* – виростки стегнової кістки; *б* – виростки великогомілкової кістки; *в* – суглобовий хрящ стегнової кістки; *г* – меніски

**Рис. 6.** Напруження на елементах моделі при корекції початкової деформації 15° – гіперкорекція 5°: *a* – виростки стегнової кістки; *б* – виростки великогомілкової кістки; *в* – суглобовий хрящ стегнової кістки; *г* – меніски

Отже, на основі аналізу напружено-деформованого стану структур колінного суглоба при різних ступенях корекції деформації голілки при хворобі Ерлахера-Блаунта встановлено, що при гіперкорекції більше 10° відзначається зростання напружень на зовнішніх виростках стегна та великогомілкової кістки, зовнішній частині суглобового хряща та латеральному меніску. В даному випадку напруження цих структур дося-

гають значень, які відзначалися на медіальних поверхнях структур в доопераційному періоді. Таким чином, корекція деформації при хворобі Блаунта в межах від нормокорекції до гіперкорекції на 10° є оптимальною з точки зору профілактики дегенеративних змін у структурах колінного суглоба.

Враховуючи отримані результати, для профілактики рецидивів деформації голілки не слід рекомендувати



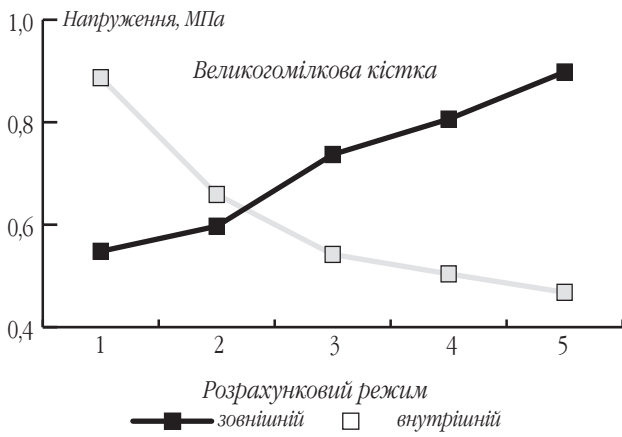
**Рис. 7.** Напруження на елементах моделі при корекції початкової деформації 20° – гіперкорекція 10°: *а* – виростки стегнової кістки; *б* – виростки великогомілкової кістки; *в* – суглобовий хрящ стегнової кістки; *г* – меніски

**Рис. 8.** Напруження на елементах моделі при корекції початкової деформації 25° – гіперкорекція 15°: *а* – виростки стегнової кістки; *б* – виростки великогомілкової кістки; *в* – суглобовий хрящ стегнової кістки; *г* – меніски

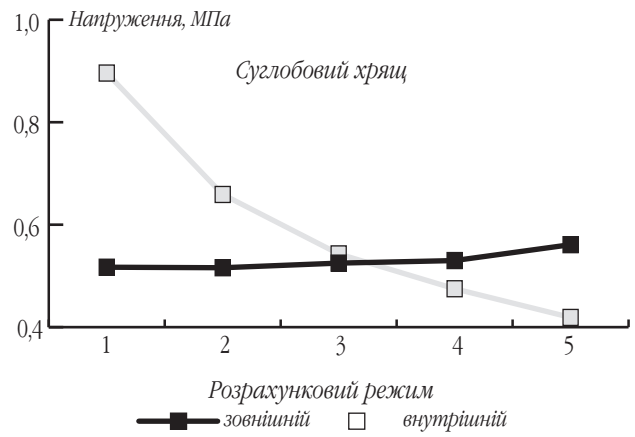
значну гіперкорекцію деформації, а використовувати в поєднанні з остеотомією тимчасове блокування зон росту великогомілкової та в деяких випадках стегнової кістки, що дозволить запобігти рецидиву деформації та забезпечить можливість оптимальної корекції з метою запобігання ймовірним дегенеративним змінам у структурах колінного суглоба.

## Висновки

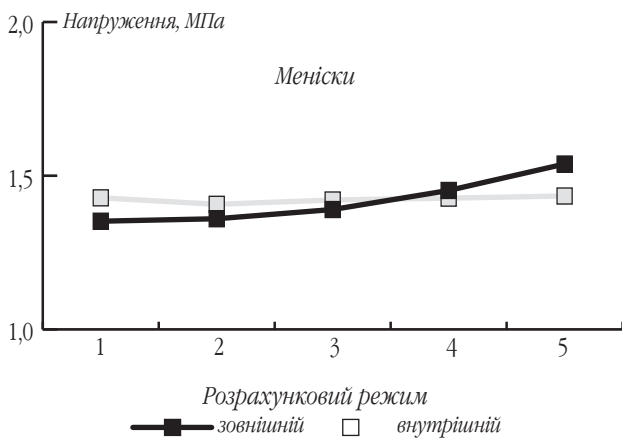
1. При скінченно-елементному моделюванні різних показників ступеня корекції варусної деформації встановлено значне зростання напружень на структурах колінного суглоба при корекції більше 10° вальгусного відхилення.



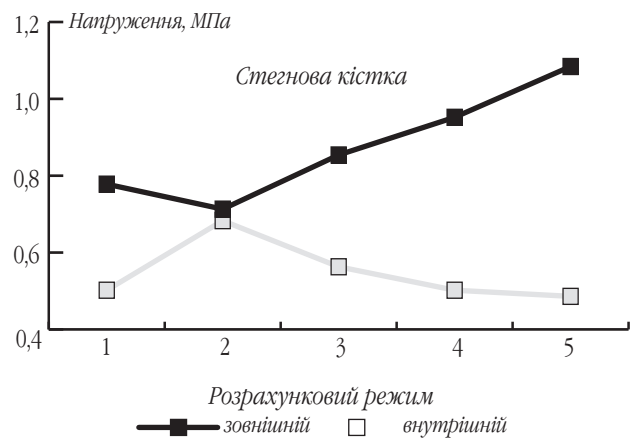
**Рис. 9.** Графік зміни напружень на виростках великогомілкової кістки залежно від ступеня корекції



**Рис. 10.** Графік зміни напружень на суглобовому хрящі залежно від ступеня корекції



**Рис. 11.** Графік зміни напружень на м'яких тканинах залежно від ступеня корекції



**Рис. 12.** Графік зміни напружень на виростках стегнової кістки залежно від ступеня корекції

2. На основі проведеного аналізу НДС структур колінного суглоба у пацієнтів з хворобою Блаунта встановлено, що оптимальним варіантом корекції варусної деформації є її нормокорекція, допустимим – гіперкорекція до 10° вальгусного відхилення. Гіперкорекція більше 10° є несприятливою, оскільки збільшує ризик дегенеративних змін у структурах колінного суглоба.
3. Враховуючи дані аналізу НДС структур колінного суглоба у пацієнтів з хворобою Блаунта, доцільно рекомендувати максимальну гіперкорекцію в межах до 10° вальгусного відхилення, а для запобігання рецидивам деформації – поєднувати це оперативне втручання із тимчасовим блокуванням латеральної зони росту великогомілкової кістки з урахуванням скелетної зрілості колінного суглоба та ступеня деформації.

## Література

1. *Langenskiold A.* Tibia vara. A critical review / *A. Langenskiold* / Clin. Orthop. Relat. Res. – 1989. – V. 246. – P. 195–207.
2. *Sabbarwal S.* Current concepts review. Blount disease / *S. Sabbarwal* / J. Bone Joint Surg. Am. – 2009. – V. 9. – P. 1758–1776.
3. *Abdelgawad A.* Combined distal tibial rotational osteotomy and proximal growth plate modulation for treatment of infantile Blount's disease / *A. Abdelgawad* / Amr World J Orthop. – 2013. – V. 18. № 4(2). – P. 90–93.
4. *Siregar P.U.* Bamboo Osteotomy for Blount's Disease / *P.U. Siregar* / Malaysian Orthopaedic Journal. – 2010. – V. 4. – № 1.
5. *Ferriter P.* Infantile tibia vara: factors affecting outcome following proximal tibial osteotomy / *P. Ferriter, F. Shapiro* / J. Pediatr. Orthop. – 1987. – V. 7. – P. 1–7.
6. *Doyle B.S.* Infantile Blount disease: long-term follow-up of surgically treated patients at skeletal maturity / *Doyle B.S., Volk A.G., Smith C.F.* / J. Pediatr. Orthop. – 1996. – V. 16. – P. 469–476.
7. *Khanfour A.A.* Does Langenskiold staging have a good prognostic value in late onset tibia vara? / *A.A. Khanfour* / Journal of Orthopaedic Surgery and Research. – 2012. – V. 7. – P. 23–30.
8. *Шаргородский В.С.* Остеотомия и ее клинично-биомеханическое обоснование при варусных искривлениях нижних конечностей / *В.С. Шаргородский* / Диссерт. на соиск. уч. ст. доктора мед. наук. – К, 1973. – 336 с.
9. *Лазарев І.А.* Математичне моделювання з визначенням напружено-деформованого стану в тібіофemorальній зоні в умовах дефекту суглобового хряща / *Лазарев І.А., Костогриз О.А., Скибан М.В.* // Травма. – 2013. – Т. 14. – № 4. – С. 57–63.
10. *Kubicbek M.* Stress strain analysis of knee joint / *M. Kubicbek, Z. Florian* / Engineering mechanics. – 2009. – Vol. 16. – № 5. – P. 318.