

УДК 616.718.19-001.5-089

МИТЕЛЕВА З.М.¹, СНИСАРЕНКО П.И.², ЗЕЛЕНЕЦКИЙ И.Б.³, КАРПИНСКИЙ М.Ю.¹, ЯРЕСЬКО А.В.¹¹ГУ «Институт патологии позвоночника и суставов им. проф. М.И. Ситенко НАМН Украины», г. Киев²Николаевская городская больница № 3³Харьковская медицинская академия последипломного образования

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МОДЕЛЕЙ КОЛЕННОГО СУСТАВА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВЕЛИЧИНЫ ВАРУСНОЙ ДЕФОРМАЦИИ И ТОЛЩИНЫ СУСТАВНОГО ХРЯЩА

Резюме. В статье приведены результаты математического моделирования напряженно-деформированного состояния коленного сустава в зависимости от величины варусной деформации и толщины суставного хряща. Доказано, что изменения толщины суставного хряща в коленном суставе практически не сказываются на распределении напряжений как в костных структурах, так и на суставных поверхностях. Все значительные изменения зависят от величины варусной деформации.

Гонартроз является одним из самых распространенных заболеваний коленного сустава. Согласно теории Б.И. Сименача о наследственной предрасположенности к заболеваниям [1, 2] и предложенной им модели «Артроз» [3], возможны два варианта развития этого недуга. В первом случае (артрозирующая деформация) наличие врожденной или приобретенной деформации коленного сустава приводит к изменению условий его нагружения, далее к разрушению хряща и артрозу. Во втором случае (деформирующий артроз) наличие наследственных или приобретенных метаболических факторов вызывает воспалительный процесс в хрящевой ткани, далее разрушение хряща, изменение условий нагружения коленного сустава и развитие деформации. Остается дискуссионным вопрос: что имеет ключевое значение в условиях нагружения коленного сустава — наличие деформации или отсутствие хряща?

Отсюда вытекает **цель** работы: изучить напряженно-деформированное состояние коленного сустава в зависимости от величины варусной деформации и толщины суставного хряща.

Материалы и методы исследования

Для решения поставленной задачи в лаборатории биомеханики ГУ «ИППС им. проф. М.И. Ситенко НАМНУ» были разработаны конечно-элементные модели нижней конечности в вариантах нормы и варусной деформации величиной 10 и 15° (рис. 1). Вальгусную деформацию решили не рассматривать, т.к. характер изменений напряженно-деформированного состояния моделей должен соответствовать



Рисунок 1. Модель нижней конечности: а — норма (фронтальная плоскость); б — варусная деформация 10°; в — варусная деформация 15°

© Мителева З.М., Снисаренко П.И., Зеленецкий И.Б., Карпинский М.Ю., Яресько А.В., 2015

© «Травма», 2015

© Заславский А.Ю., 2015

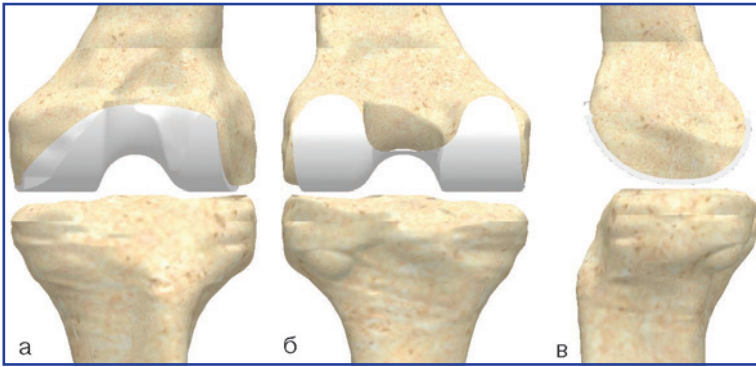


Рисунок 2. Модель хрящевой поверхности коленного сустава: а – вид спереди; б – вид сзади; в – вид в сагиттальной плоскости

варусной деформации с перемещением пиковых напряжений на противоположный мыщелок.

Модели состояли из следующих элементов: бедренная кость (БК), большеберцовая кость (ББК), надколенник, суставной хрящ.

Модель суставного хряща выполнялась в виде двух слоев, что позволяло уменьшить толщину хряща в 2 раза. Таким образом мы моделировали 2 состояния сустава с толщиной хряща 2 и 1 мм (рис. 2).

Таблица 1. Механические свойства материалов, использованных при моделировании

Материал	Модуль упругости, МПа	Коэффициент Пуассона
Кортикальная кость	18350	0,3
Губчатая кость	330	0,3
Хрящ	10,5	0,49

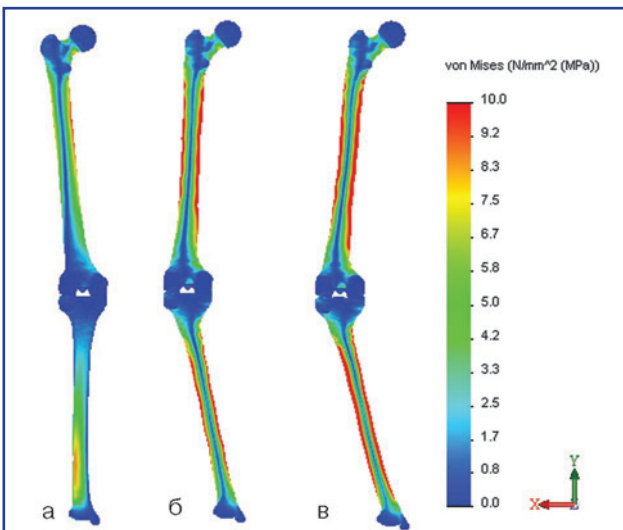


Рисунок 3. Напряженно-деформированное состояние моделей в зависимости от величины деформации конечности: а – норма; б – варусная деформация 10°; в – варусная деформация 15°

При моделировании использовали механические характеристики биологических тканей согласно данным В.А. Березовского (1990) [4]. Механические свойства материалов, использованных при моделировании, приведены в табл. 1.

Модель имела жесткое закрепление на дистальном конце большеберцовой кости. К головке бедренной кости прикладывали распределенную нагрузку величиной 700 Н, что соответствует нагрузке на конечность при одноопорном стоянии.

Результаты исследования

На первом этапе работы мы изучали влияние величины варусной деформации на распределение напряжений как в элементах нижней конечности в целом, так и в коленном суставе в частности. Картина напряженно-деформированного состояния

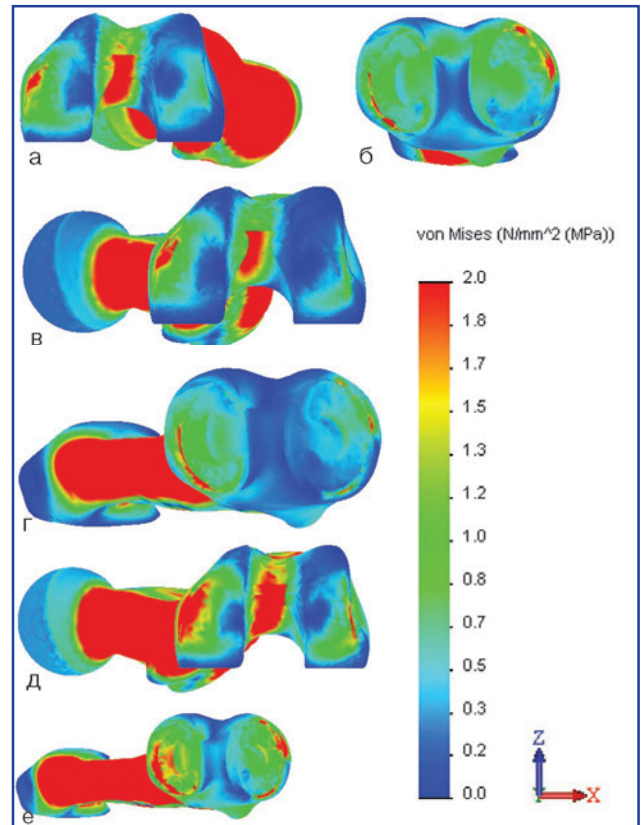


Рисунок 4. Напряженно-деформированное состояние суставных поверхностей моделей в зависимости от величины варусной деформации: а – мыщелки бедренной кости в норме; б – суставная поверхность ББК в норме; в – мыщелки бедренной кости при варусной деформации 10°; г – суставная поверхность ББК при варусной деформации 10°; д – мыщелки бедренной кости при варусной деформации 15°; е – суставная поверхность ББК при варусной деформации 15°

Таблица 2. Максимальные величины напряжений в элементах моделей в зависимости от величины деформации конечности

Зона модели	Величина деформации		
	Норма	Варус 10°	Варус 15°
	Напряжение, МПа		
Шейка БК	8,9	8	8
Диафиз БК — медиальная сторона	10	14,5	15,8
Диафиз БК — латеральная сторона	8,3	12,6	14,8
Суставная поверхность БК — медиальный мыщелок	2,3	4	3,9
Суставная поверхность БК — середина	1,5	3,3	4,2
Суставная поверхность БК — латеральный мыщелок	0,4	1,4	2,3
Суставная поверхность ББК — медиальная сторона	1,4	3,7	3,8
Суставная поверхность ББК — латеральная сторона	1,7	1,6	2,3
Диафиз ББК — медиальная сторона	2,6	13,9	17,8
Диафиз ББК — латеральная сторона	2,6	11,1	14,4
Фронтальная поверхность дистального отдела ББК	7,4	2	1,1
Задняя поверхность дистального отдела ББК	8,6	2,1	1,5

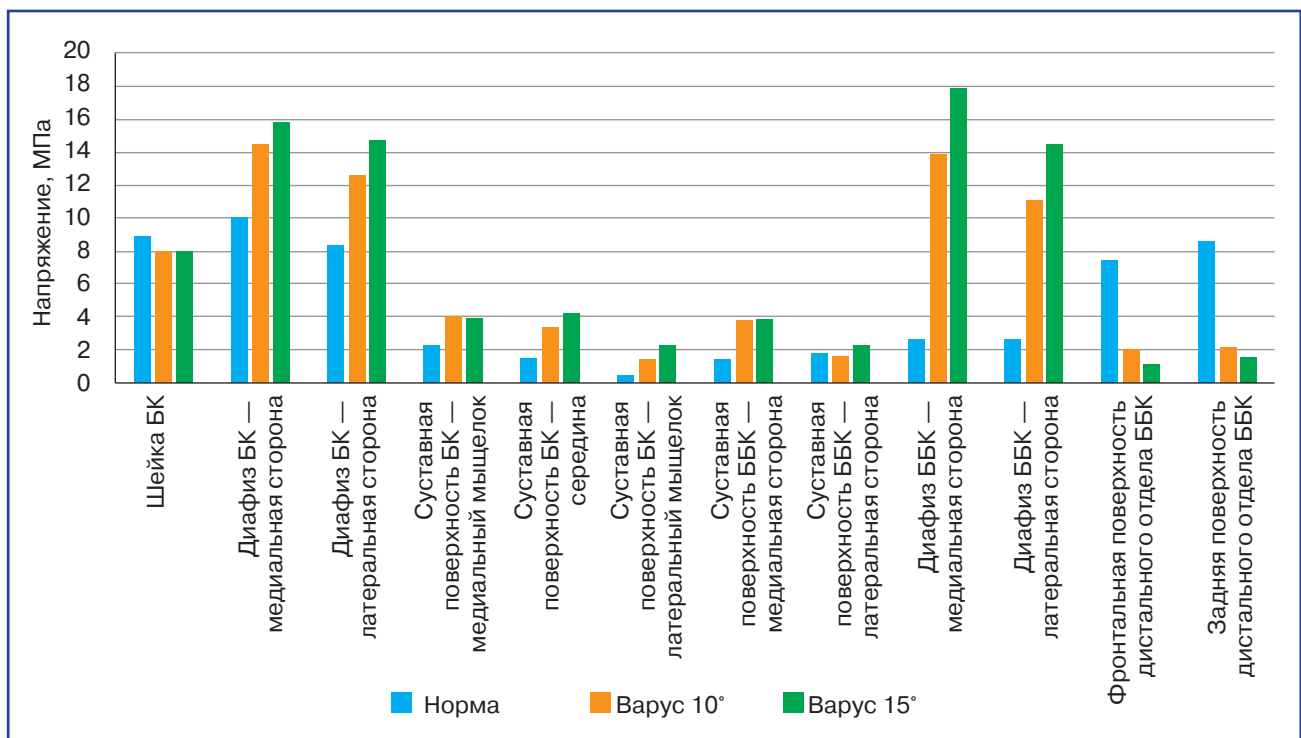
моделей с разными величинами варусной деформации представлена на рис. 3.

Как видим, наличие варусной деформации приводит к увеличению напряжений по медиальной и латеральной поверхностям бедренной и большеберцовой костей. Причем величина максимальных значений напряжений возрастает с увеличением угла деформации. При этом уровень напряжений на фронтальных и задних поверхностях этих костей снижается, а в

шейке бедренной кости остается практически неизменным.

Такая же картина наблюдается и на суставной поверхности коленного сустава (рис. 4).

На суставной поверхности коленного сустава наблюдается повышение уровня напряжений по медиальной стороне с ростом величины варусной деформации. В числовом выражении величины максимальных напряжений в разных отделах моделей в зависимости

**Рисунок 5. Диаграмма максимальных величин напряжений в элементах моделей в зависимости от величины деформации конечности**

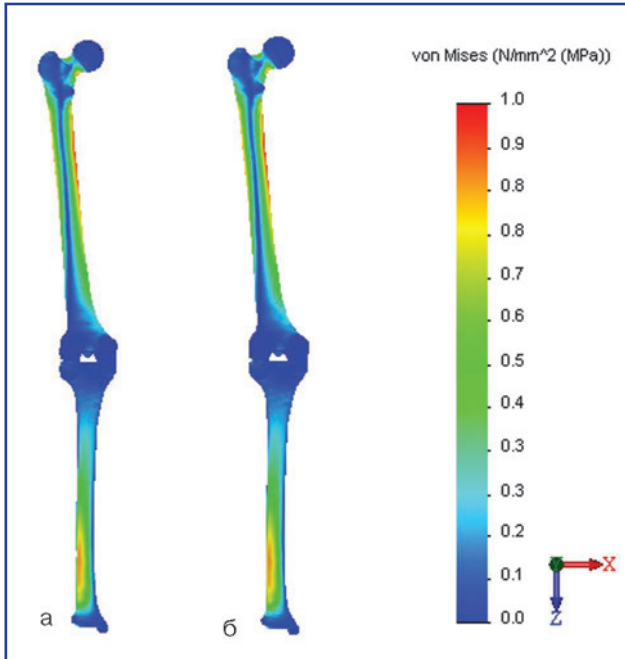


Рисунок 6. Напряженно-деформированное состояние моделей в зависимости от толщины суставного хряща: а — толщина хряща 2 мм; б — толщина хряща 1 мм

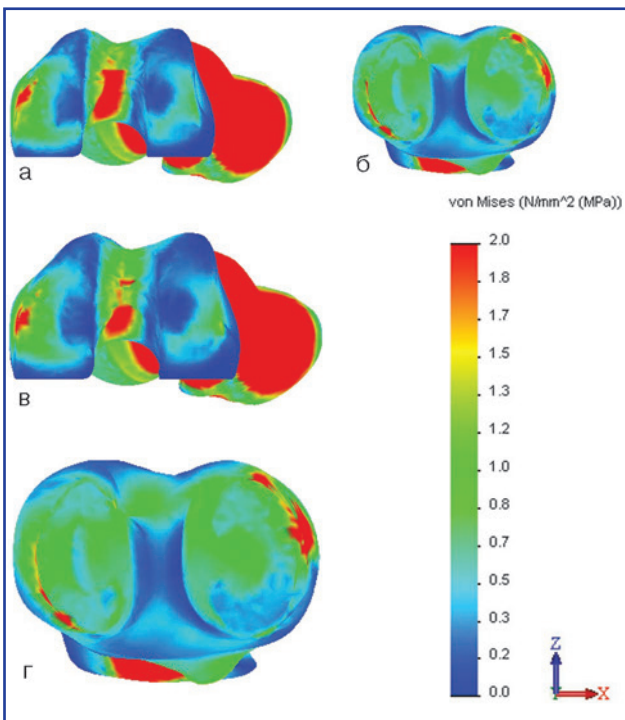


Рисунок 7. Напряженно-деформированное состояние суставных поверхностей моделей в зависимости от толщины суставного хряща: а — мыщелки бедренной кости при толщине хряща 2 мм; б — суставная поверхность ББК при толщине хряща 1 мм; в — мыщелки бедренной кости при толщине хряща 1 мм; г — суставная поверхность ББК при толщине хряща 1 мм

от величины варусной деформации представлены в табл. 2.

Более наглядно характер изменений величин напряжений в различных элементах моделей в зависимости от величины варусной деформации представлен на диаграмме (рис. 5).

В результате проведенного исследования можно заключить, что в норме напряжения в диафизах бедренной и большеберцовой костей распределяются равномерно по всей окружности. Наличие варусной деформации приводит к перераспределению напряжений с передней и задней поверхностями диафизов костей на их медиальные и латеральные поверхности, причем на медиальные в большей степени. На суставных поверхностях также наблюдается повышение напряжений на медиальной стороне. Максимальные значения напряжений в указанных зонах возрастают с увеличением величины деформации.

На следующем этапе работы мы выясняли влияние толщины суставного хряща на распределение напряжений в элементах моделей. Картина напряженно-деформированного состояния моделей в зависимости от толщины хряща в коленном суставе представлена на рис. 6.

Как показали наши исследования, изменение толщины хряща никак не сказывается на уровне напряже-

Таблица 3. Максимальные величины напряжений в элементах моделей в зависимости от толщины суставного хряща

Зона модели	Напряжение, МПа	
	Толщина хряща	
	2 мм	1 мм
Шейка БК	8,9	8,9
Диафиз БК — медиальная сторона	10	10
Диафиз БК — латеральная сторона	8,3	8,3
Суставная поверхность БК — медиальный мыщелок	2,3	1,6
Суставная поверхность БК — середина	1,5	1,3
Суставная поверхность БК — латеральный мыщелок	0,4	0,7
Суставная поверхность ББК — медиальная сторона	1,4	1,4
Суставная поверхность ББК — латеральная сторона	1,7	1,8
Диафиз ББК — медиальная сторона	2,6	2,6
Диафиз ББК — латеральная сторона	2,6	2,6
Фронтальная поверхность дистального отдела ББК	7,4	7,4
Задняя поверхность дистального отдела ББК	8,6	8,6

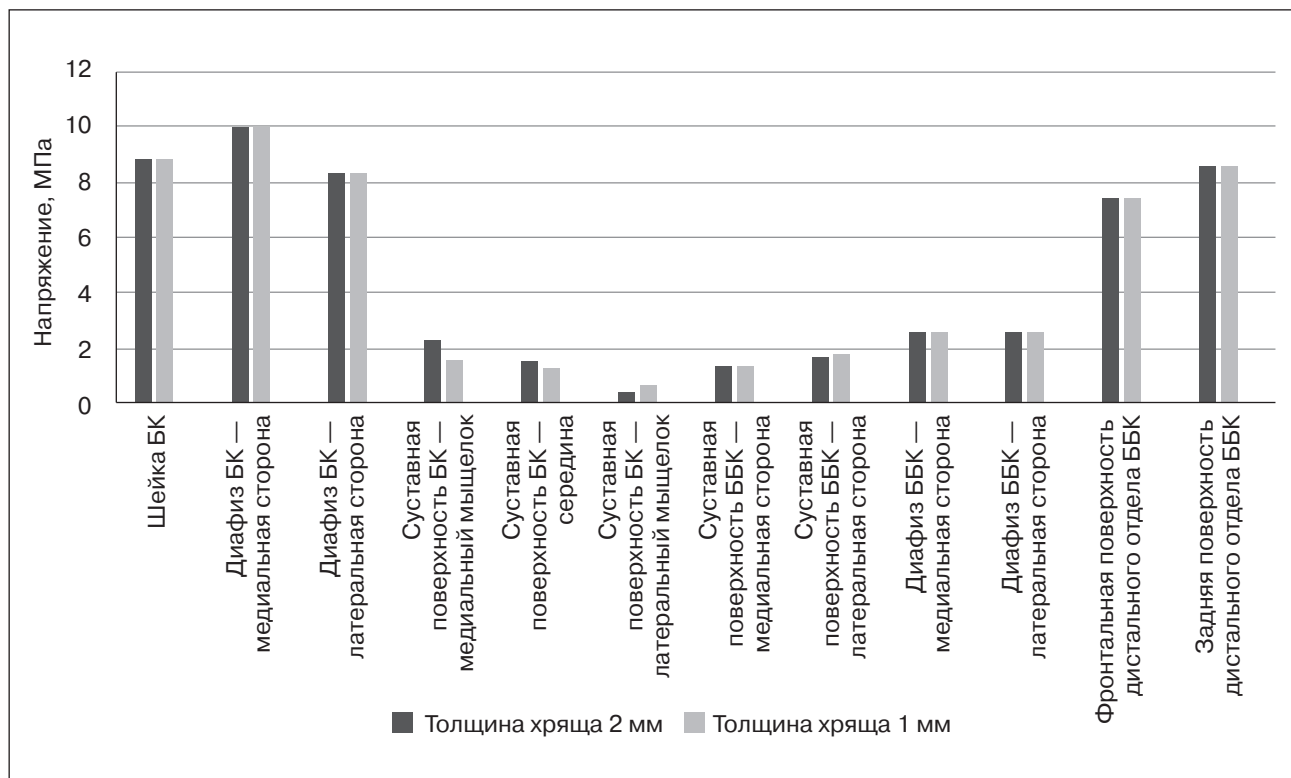


Рисунок 8. Диаграмма максимальных величин напряжений в элементах моделей в зависимости от толщины суставного хряща

ний в костных структурах. На суставных поверхностях присутствуют незначительные изменения. Их можно разглядеть на рис. 7.

В хрящевых структурах наиболее заметные изменения выявлены на мыщелках бедренной кости. С уменьшением толщины хряща напряжения на медиальном мыщелке снижаются с 2,3 до 1,6 МПа, на латеральном — повышаются от 0,4 до 0,7 МПа. На суставной поверхности большеберцовой кости изменения крайне незначительны. В абсолютных величинах значения максимальных напряжений в элементах моделей в зависимости от толщины хряща представлены в табл. 3.

Более наглядно характер изменений напряжений в элементах моделей в зависимости от толщины хряща представлен на диаграмме (рис. 8).

Как видим, изменение толщины хряща вносит очень незначительные изменения в картину напряженно-деформированного состояния моделей.

Выводы

Напряжения в диафизах бедренной и большеберцовой костей в норме распределяются равномерно по всей окружности. Наличие варусной деформации приводит к перераспределению напряжений с передней и задней поверхностей диафизов костей на их медиальные и латеральные поверхности, причем на медиальные в большей степени. На суставных поверхностях также наблюдается повышение напряжений на медиальной стороне. Максимальные значения напряжений

в указанных зонах возрастают с увеличением величины деформации.

Изменения толщины суставного хряща в коленном суставе практически не сказываются на распределении напряжений как в костных структурах, так и на суставных поверхностях.

Список литературы

1. Сіменач Б.І. Спадково-схильні захворювання суглобів: теоретико-методологічне обґрунтування (на моделі колінного суглоба) / Б.І. Сіменач. — Х.: Основа, 1998. — 200 с.
2. Сіменач Б. Мультифакторіальність як пошуковий критерій (на моделі захворювань суглобів та хребта, зумовлених спадковою схильністю) / Б. Сіменач, П. Снісаренко, О. Бабуркіна та ін. // Ортопед., травматол. — 2005. — № 2. — С. 110-115.
3. Сіменач Б.І. Артроз як теоретико-методологічна проблема. Авторська версія / Б.І. Сіменач, П.І. Снісаренко, О.П. Бабуркіна. — Х.: Крокус, 2004. — 126 с.
4. Березовский В.А., Колотилов Н.Н. Биофизические характеристики тканей человека: Справочник. — К.: Наукова думка, 1990. — 224 с.
5. Зенкевич О.К. Метод конечных элементов в технике — М.: Мир, 1978. — 519 с.
6. Алямовский А.А. SolidWorks/COSMOSWorks. Инженерный анализ методом конечных элементов / А.А. Алямовский. — М.: ДМК Пресс, 2004. — 432 с.

Отримано 09.04.15 ■

Мітелева З.М.¹, Снісаренко П.І.², Зеленецький І.Б.³,
Карпінський М.Ю.¹, Яресько А.В.¹

¹ДУ «Інститут патології хребта та суглобів
ім. проф. М.І. Ситенка НАМН України», м. Київ

²Миколаївська міська лікарня № 3

³Харківська медична академія післядипломної освіти

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ МОДЕЛЕЙ КОЛІННОГО СУГЛОБА ЗАЛЕЖНО ВІД ВЕЛИЧИНИ ВАРУСНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ ТА ТОВЩИНИ СУГЛОБОВОГО ХРЯЩА

Резюме. У статті надані результати математичного моделювання напружено-деформованого стану колінного суглоба залежно від величини варусної деформації та товщини суглобового хряща. Доведено, що зміна товщини суглобового хряща в колінному суглобі практично не впливає на розподіл навантажень як у кісткових структурах, так і на суглобових поверхнях. Усі значні зміни залежать від варусної деформації.

Miteleva Z.M.¹, Snisarenko P.I.², Zelenetskyi I.B.³,
Karpinskyi M.Yu.¹, Yaresko A.V.¹

¹State Institution «Institute of Spine and Joint Pathology
named after prof. M.I. Sytenko of National Academy
of Medical Sciences of Ukraine», Kharkiv

²Mykolaiv City Hospital № 3, Mykolaiv

³Kharkiv Medical Academy of Postgraduate Education,
Kharkiv, Ukraine

INVESTIGATION OF THE STRESS-STRAIN STATE OF KNEE JOINT MODELS DEPENDING ON THE AMOUNT OF VARUS DEFORMITY AND THE THICKNESS OF THE ARTICULAR CARTILAGE

Summary. The paper presents the results of mathematical modeling of the stress-strain state of the knee joint depending on the amount of varus deformity and the thickness of the articular cartilage. It is proved that the changes in the thickness of the articular cartilage in the knee joint have almost no effect on the stress distribution in both bone structures, and on the articular surfaces. All significant changes depend on the varus deformity.