

## МОДЕЛЮВАННЯ УМОВ НАВАНТАЖЕННЯ КОЛІННОГО СУГЛОБА З ПОЗИЦІЙ МЕХАНІКИ

К. Б. Пустовойт, М. Ю. Карпінський

Харківська медична академія післядипломної освіти,

Інститут патології хребта та суглобів ім. проф. М. І. Ситенка НАМН України, м. Харків

## MODELLING OF THE KNEE JOINT LOADING CONDITIONS IN THE SENSE OF MECHANICS

K. B. Pustovoit, M. Yu. Karpinskiy

### РЕФЕРАТ

Наведені результати математичного моделювання роботи феморопателлярного зчленування (ФПЗ) в нормі та за умови диспластичної деформації. Встановлено, що колінний суглоб (КС) за зовнішнім виглядом та функцією — це класичний кулачковий механізм. Розроблена біомеханічна схема взаємодії виростка стегнової кістки з наколінком. Відповідно до схеми кулачкового механізму проведені експериментальні рентгенометричні дослідження. За даними статистичного аналізу, в умовах дисплазії феморопателлярного зчленування виникають зміни КС, що можуть спричинити його блокування; положення наколінка в КС залежить від особливостей анатомічної будови виростків стегнової кістки.

**Ключові слова:** колінний суглоб; наколінок; диспластичний гонартроз; математичне моделювання.

### SUMMARY

The results of mathematic modelling of work of femoropatellar joint in normal conditions and in the presence of dysplastic deformity were adduced. There was established, that a knee joint (KJ) by its external appearance and function constitutes a classic cam mechanism. Biomechanical scheme of interaction between the femoral bone processus and patella was elaborated. In accordance to scheme of cam mechanism its experimental roentgenometric investigations were performed. According to statistical analysis performed, in conditions of dysplasia in femoropatellar joint the changes in the KJ occur, which may cause its blockade; the patella position in the KJ depends on peculiarities of anatomical structure of the femoral bone processuses.

**Key words:** knee joint; patella; dysplastic gonartrosis; mathematic modelling.

Диспластична деформація КС протягом життя людини зумовлює порушення його функції, подальше руйнування — гонартроз [1, 2]. З диспластичних синдромів КС найчастіше у пацієнтів молодого віку спостерігають дисплазію ФПЗ, найпоширенішими формами якої є: гіпервальгізація горбистості великогомілкової кістки, гіпоплазія—аплазія виростків стегнової кістки, гіпоплазія—аплазія медіальної фасетки наколінка, високе розташування наколінка.

Ці диспластичні зміни як самостійно, так і в поєднанні спричиняють порушення рівноваги навантаження в усіх підсистемах КС, що зумовлює прогресування гонартрозу [3].

Наколінок в системі ФПЗ має провідне значення, що зумовлене його участю в процесі згинання й розгинання КС. Внаслідок цього виникає підвищене навантаження, надмірне зношування й руйнування наколінка з виникненням у ньому дистрофічних змін [3, 4].

Мета роботи — за допомогою математичного моделювання доповнити погляди на причини руйнування ФПЗ.

### МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Під час еволюційного розвитку людина спостерігала за природою, внаслідок чого виникли численні технічні рішення, які мають аналоги в біологічних системах. З цієї точки зору КС за зовнішнім виглядом та функцією — це класичний кулачковий механізм, який широко використовують у різних технічних приладах.

До складу елементарного триланкового кулачкового механізму входять ведуча ланка — кулачок (1), що має перемінний профіль поверхні обертання, а також робоча ланка (2), яку називають товкачем, якщо вона здійснює поступовий рух (рис. 1а) або коромислом, якщо вона з'єднана з стійкою кінематичною парою обертання (рис. 1б).

Виходячи з схеми, представленої на рис. 1, можна уявити модель КС як кулачковий механізм — вирос-

ток стегнової кістки з наколінком як робочу ланку типу коромисла.

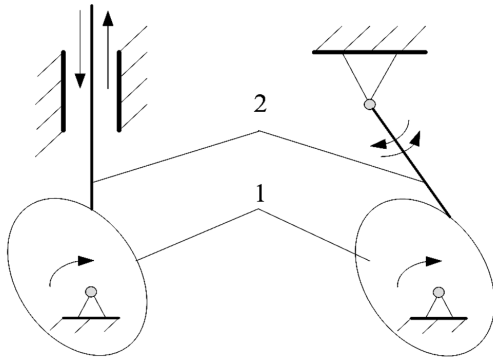


Рис. 1. Схема елементарного триланкового кулачкового механізму (пояснення в тексті).

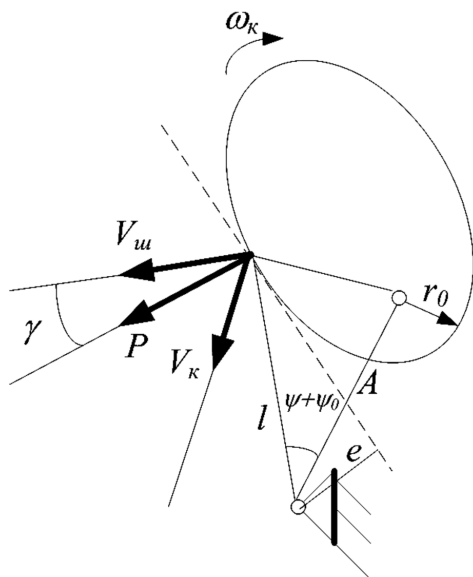


Рис. 2. Розрахункова схема взаємодії виростка стегнової кістки з наколінком.

$l$  - довжина коромисла (власна зв'язка наколінка як елемент, що практично не розтягується);  $r_0$  - базовий радіус профілю кулачка;  $P$  - сила тиску кулачка на коромисло, визначають як перпендикуляр до дотичної к профілю кулачка в точці дотику;  $V_{ш}$  - швидкість штанги, визначають як перпендикуляр до лінії коромисла;  $V_к$  - швидкість кулачка, визначають як перпендикуляр до лінії між центром обертання кулачка та точкою дотику коромисла ( $r_0$ );  $\omega_к$  - швидкість обертання кулачка;  $\gamma$  - кут тиску (кут між векторами сили тиску та швидкості штанги);  $A$  - відстань від точки кріплення коромисла до центру обертання кулачка;  $\psi + \psi_0$  - кут між коромислом та лінією, що з'єднує точку кріплення коромисла з центром обертання кулачка;  $e$  - ексцентриситет (розрахункова величина).

Розрахункова схема такої конструкції наведена на рис. 2.

**РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ**

Одним з важливих показників ефективності кулачкових механізмів є величина кута тиску ( $\gamma$ ). У

циклі руху кулачкового механізму ця величина може змінюватись, і в окремих положеннях досягати таких значень, за яких можливе блокування механізму. Таке значення кута тиску є критичним.

При плавній зміні швидкості штанги максимальне значення кута тиску, як правило, спостерігають наприкінці руху, коли швидкість штанги досягає максимального значення:

$$\gamma_{max} = \arctg \frac{(V_{ш})_{max}}{\omega_к (r_0 + s_1)} \quad (1)$$

Якщо штанга розташована ексцентрично, кут тиску визначають за формулою [5]:

$$\text{tg} \gamma = \frac{\frac{V_{ш} \pm e}{\omega_к}}{s + \sqrt{r_0^2 - e^2}} \quad (2)$$

Механізми з штангою, що качається (коромисло), розглядають як механізми з перемінним ексцентриситетом ( $e$ ), тому кут тиску може бути визначений за приблизною формулою [5]:

$$\text{tg} \gamma = \frac{\frac{V_{ш} \pm e}{\omega_к}}{A \sin(\varphi + \varphi_0)} \quad (3)$$

При цьому ексцентриситет ( $e$ ) буде дорівнювати:

$$e = A \cos(\varphi + \varphi_0) - 1 \quad (4)$$

Аналіз отриманих залежностей свідчить, що кут блокування та його максимальне значення  $\gamma_{max}$  залежать від кількох параметрів – розмірів механізму та закону руху. Чим більше базовий радіус профілю кулачка ( $r_0$ ) або відстань між центром його обертання та точкою кріплення коромисла, тим менше величина  $\gamma_{max}$ . Якщо проаналізувати рівняння (3), можна побачити, що при наближенні знаменника до нуля, тангенс кута зростає до нескінченності.

$$\lim_{\sin(\varphi + \varphi_0) \rightarrow \infty} \text{tg} \gamma \rightarrow \infty \quad (5)$$

Таке можливе за умови:

$$\lim (\sin(\varphi + \varphi_0)) \rightarrow 0 \quad (6)$$

або

$$\lim (\varphi + \varphi_0) \rightarrow 0 \quad (7)$$

При цьому виникає невизначеність напрямку руху товчача відносно кулачка.

В механізмах з плоским товчачем кут тиску дорівнює нулю ( $\gamma = 0$ ), оскільки в усіх положеннях си-

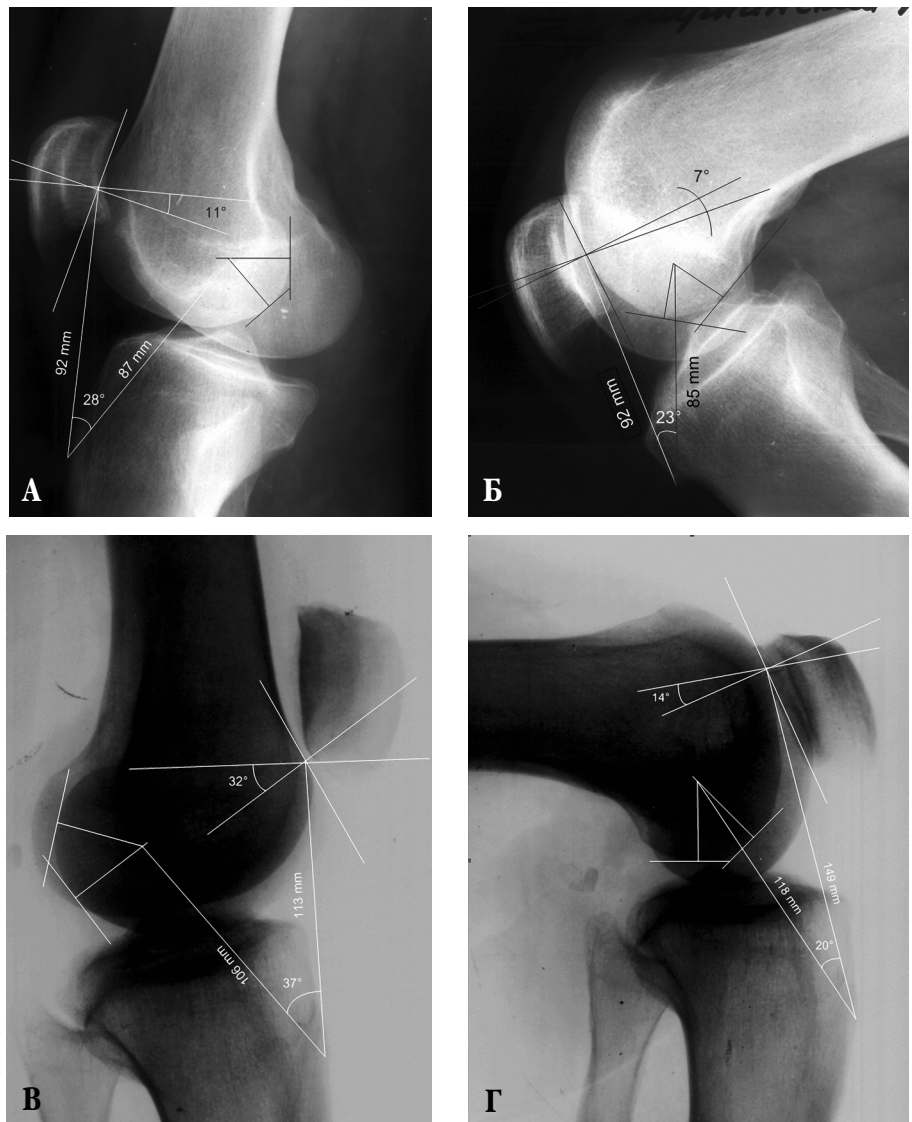


Рис. 3. Приклади рентгенометричних досліджень. А - нормальне стояння наколінка (положення розгинання); Б - нормальне стояння наколінка (положення згинання); В - високе стояння наколінка (положення розгинання); Г - високе стояння наколінка (положення згинання).

ла тиску ( $P$ ) перпендикулярна робочій площині товчача. Отже, блокування такого механізму через зміну кута взаємодії кулачка та товчача неможливе.

За результатами моделювання проведено експериментальне дослідження. Для цього відібрані профільні рентгенограми КС 5 хворих за високого стояння наколінка та 5 хворих, у яких стояння наколінка в межах норми. Досліджували рентгенограми КС у положенні згинання та розгинання.

На рис. 3. представлені приклади рентгенометричних досліджень КС за нормального та високого стояння наколінка.

Рентгенометричні дослідження проведені за схемою кулачкового механізму з робочою ланкою типу коромисло (див. рис. 2). Вимірювали такі показники:  $\gamma$  — кут тиску;  $\psi + \psi_0$  — кут між лінією, що з'єднує горбистість великогомілкової кістки з точкою дотику наколінка з виростком стегна;  $l$  — відстань від горбистості великогомілкової кістки до точки дотику на-

колінка з виростком стегна; А — відстань від горбистості великогомілкової кістки до центру обертання виростка стегнової кістки.

Центр обертання виростка стегнової кістки визначали так: до ділянки профілю виростка, що контактує з великогомілковою кісткою, проводили дві дотичні, в точках дотику до них будували перпендикуляри, точку пересічення перпендикулярів вважали за центр обертання виростка.

За результатами вимірювань обчислювали критичне значення кута тиску. Отримані результати оброблені за методами описової статистики. Визначали середнє значення вибірки  $M$ , стандартне відхилення  $SD$ , стандартну похибку  $SE$ . За допомогою  $T$ -тесту для парних вибірок порівнювали отримані значення кута тиску з розрахованими його критичними значеннями. Результати дослідження наведені у таблиці.

В результаті аналізу доведено, що за нормальної анатомічної будови КС його блокування неможливе

### Результати аналізу рентгенометричних досліджень

Група	Положення КС	Експериментальні значення			Розраховані значення критичного кута тиску			Різниця між середнім та критичним значеннями	P<
		M	SD	SE	M	SD	SE		
Норма	Розгинання	11,8	1,9	0,4	33,1	2,1	0,4	21,2	0,001
	Згинання	8,7	2,1	0,4	36,4	2,3	0,4	27,3	0,001
Високе стояння надколінка	Розгинання	31,2	1,6	0,4	29,7	1,4	0,4	-1,5	0,05
	Згинання	14,4	2,4	0,5	44,2	1,9	0,4	29,7	0,001

як в положенні згинання, так і розгинання. За високого стояння наколінка в положенні розгинання значення кута тиску дуже близьке до розрахованого критичного значення, за якого можливе блокування КС.

Також доведено, що при згинанні КС за високого стояння наколінка критичне значення кута тиску значно збільшується — до  $(44,2 \pm 1,9)^\circ$  і достовірно відрізняється від аналогічного показника за нормального стояння наколінка —  $(36,4 \pm 2,3)^\circ$ .

За результатами проведеного дослідження вважаємо, що в більшості спостережень високе стояння наколінка зумовлене геометричними особливостями анатомічної будови КС, зокрема, виростка стегнової кістки. Наколінок розташований так, щоб забезпечити нормальну роботу КС в положенні його згинання.

### ВИСНОВКИ

1. За нормальної анатомічної будови КС його блокування неможливе. Проте, за диспластичної деформації кісткових структур КС, які спричиняють руйнування хрящової тканини та у подальшому появу гонартрозу, виникає підвищене тертя в суглобі, що може спричинити його блокування.

2. Високе стояння наколінка зумовлене геометричними особливостями анатомічної будови КС, зокрема, виростків стегнової кістки.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Корж Н. А. Остеоартроз — подходы к лечению / Н. А. Корж, В. А. Филиппенко, Н. В. Дедух // Вісн. ортопедії, травматології та протезування. — 2004. — № 3. — С. 75 — 78.
2. Зазірний І. М. Сучасні погляди на етіологію і патогенез остеоартрозу / І. М. Зазірний // Лік. справа. — 2003. — № 2. — С. 7 — 12.
3. Бабуркіна Е. П. Синдром нарушения нагружения феморопателлярного сочленения диспластического генеза: автореф. дис. ... канд. мед. наук / Е. П. Бабуркіна. — Х., 1996. — 26 с.
4. Сіменач Б. І. Синдром артрозуючої деформації, зумовленої спадковою схильністю / Б. І. Сіменач, О. П. Бабуркіна, П. І. Снісаренко // Ортопедія, травматологія. — 2004. — № 3. — С. 95 — 106.
5. Артоболовский С. И. Теория механизмов и машин / С. И. Артоболовский. — М.: Высш. шк., 1967. — 364 с.

