

**Лекція**  
**БІОМЕХАНІКА ПРОТЕЗУВАННЯ ВЕРХНІХ КІНЦІВОК**

**БІОМЕХАНІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ РУХОВОГО  
АПАРАТУ ВЕРХНЬОЇ КІНЦІВКИ**

Верхня кінцівка складається з трьох сегментів: плеча, передпліччя і кистей. Верхня кінцівка відносно плечового пояса має суму степенів рухливості, що дорівнює 27; 7 з цих степенів приходяться на суглоби кисті. З точки зору біомеханіки, верхня кінцівка являє собою незамкнений біокінематичний ланцюг, забезпечений кінематичними парами з числом степенів свободи, що дорівнюють 1, 2 і 3.

*Таблиця 1.1*

Суглоб	Число степенів свободи суглобу
Плечовий	3
Ліктювий	1
Променеліктювий	1
Променезап'ястний	2
Зап'ястно-п'ястний суглоб першої п'ястної кістки	2
П'ястно-фаланговий суглоб I пальця	1
Міжфаланговий суглоб I пальця	1
П'ястно-фалангові суглоби II-V пальців	2
Проксимальні міжфалангові суглоби II-V пальців	1
Дистальні міжфалангові суглоби II-V пальців	1

Межі рухливості в суглобах верхніх кінцівок представлені в табл. 1.2.

*Таблиця 1.2*

**Об'єм рухів в суглобах**

Найменування суглобу	Вид руху	Анатомічно допустимий розмах рухів, градуси
Плечовий	Згинання - розгинання	120-150
	Відведення	90-100
	Ротація	70-80
Ліктювий	Згинання - розгинання	140-150
	Пронація - супінація	140-170
	Згинання - розгинання	150-160
Променеліктювий	Відведення - приведення	70-90
Променезап'ястний		

Розмах рухів в суглобах верхніх кінцівок, що виконуються здоровими людьми, значно менший анатомічно допустимих, в зв'язку з чим доцільно

ввести поняття про біомеханічно виправдані амплітуди рухливості в суглобах, які для великих суглобів в 1,5-2 рази менші анатомічних амплітуд рухливості і вимагають значно менших енергетичних витрат. Облік амплітуд рухливості істотно полегшує розробку штучних суглобів і приводів при проектуванні протезів і апаратів верхніх кінцівок. Зокрема, в протезах, призначених для виконання побутових рухів, а також не дуже важких і складних робочих рухів, можна обмежитися наступними амплітудами рухливості в штучних суглобах: згинання - розгинання в ліктьовому шарнірі (120-125°), пронація - супінація передпліччя (90-100°), згинання - розгинання кисті (50-60°).

У ряді випадків з позицій біомеханіки променеліктьовий та промене-зап'ястний суглоби умовно зводять до однієї кінематичної пари, яка допускає ступінь рухливості кисті відносно передпліччя, що дорівнює 3.

**Біомеханічні особливості кисті.** З ціллю вивчення основних функцій природної кисті використовуються різні методи дослідження: кінематоциклографію, стереофотограметрію, динамометрію, електричну реєстрацію кутових переміщень у всіх суглобах пальців за допомогою мініатюрних змінних резисторів.

Найбільш важливими функціями пальців кисті, з точки зору відтворення їх за допомогою штучної кисті, є функції схоплення, дрібні рухові функції, а також комбіновані функції, при виконанні яких одні пальці втримують предмет, а інші - маніпулюють з ним.

На рис. 1.5 представлена класифікація способів і видів схоплення, основана на силовій, кінематичній і геометричній ознаках: 1) характеристика силової взаємодії I пальця з довгими пальцями; 2) співвідношення кутових швидкостей в суглобах I пальця і довгих пальців; 3) взаємне положення площин згинання I і II пальців. Представлена класифікація включає в себе 4 способи схоплення, кожний з яких диференціюється за видами.

Експериментальні дослідження різних видів схоплення і аналіз класифікаційної схеми дозволили виявити найважливішу роль пальців у виконанні більшості функцій кисті, пов'язаних з обхватом предметів, в забезпеченні належної сили схоплення і різноманітних форм схоплення, виявити значні якісні і кількісні відмінності силових, кінематичних і геометричних характеристик I пальця в порівнянні з іншими пальцями.

Особливу увагу, з точки зору відтворення функції кисті, потрібно звернути на I зап'ястно-п'ястний суглоб. Виявилось, що при виконанні основних видів схоплення більшість рухів I пальця здійснюється за рахунок рухливості саме в цьому суглобі. З цієї точки зору біомеханічне представлення I пальця відрізняється від анатомічних понять, згідно яким I палець складається тільки з двох фаланг. З позицій біомеханіки, враховуючи співдружність виконання рухів I пальцем з першою п'ястною кісткою, зручніше розглядати I палець як триланковий кінематичний ланцюг, в якому нарівні з двома фалангами входить I п'ястна кістка. Цими трьома кістками і визначається функціональна довжина I пальця, причому зап'ястно-п'ястний суглоб з двома степенями рухливості є найважливішим суглобом не тільки I

пальця, але і всієї кисті загалом. Наявність в цьому суглобі двох степенів добре розвиненої рухливості дозволяє I пальцю займати в кисті пануюче положення, вільно взаємодіяти з будь-яким з інших пальців, здійснювати великий об'єм рухів як в положенні зіставлення, так і в положенні відведення.








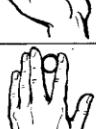

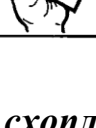
Характеристика способу схоплення	Вид схоплення	Характеристика виду схоплення	Схема силової взаємодії	R	$K = \frac{\omega}{\omega_1}$	$\varphi^\circ$
Максимальна сила схоплення відповідає меншій з двох сил, які можуть розвинути протиставлені один одному пальці	Кінцеве	Прикладення сил за допомогою кінцевих фаланг		$F_{I, \max} = F_{II-V, \max}; R_{\max} = F_{I-V}$ $F_{I, \max} > F_{II-V, \max}; R_{\max} = F_{I-V}$ $F_{I, \max} < F_{II-V, \max}; R_{\max} = F_{II-V}$	$\approx 1$	$\approx \frac{2}{3} \pi$
	Пальцеве	В прикладенні сил приймають участь, крім кінцевих, також і інші фаланги				
Загальна сила схоплення відповідає сумі сил, що прикладені I пальцем та групою довгих пальців	Долонне (відкрите)	При захопленні предмету I палець та довгі пальці безпосередньо тиснуть на предмет			$\approx 1$	$\frac{\pi}{2} < \varphi < \frac{2\pi}{3}$
	Купачче (закрите)	При захопленні предмету I палець тисне на довгі пальці		$\bar{R} = F_I + F_{II-V}$	$\varphi_{защ 1} K \ll 1$ $\varphi_{защ 2} K \gg 1$ $\varphi_{защ 3} K < 1$	$\approx \frac{2}{3} \pi$
	Напівбічне схоплення	Предмет притискається до долоні довгими пальцями і відведеним I пальцем			$> 1$	$\approx \frac{\pi}{2}$
Сила схоплення відповідає силі I пальця	Бічне схоплення (зовнішнє)	I палець протистоїть бічна поверхня II пальця		$R = F_I$	$> 1$	$\approx \frac{\pi}{2}$
	Бічне схоплення (внутрішнє)	I палець протистоїть долоння поверхня кисті				
Силові взаємодії I пальця з довгими пальцями відсутні	Схоплення довгими пальцями	I палець в захопленні предмету участі не приймає		$R = F_{II-V}$	$\uparrow 8$	—
	Бічне схоплення довгими пальцями	Предмет захоплюється двома довгими пальцями (бічною поверхнею)		$R = F_I = F_{II-V}$		
	Схоплення левим пальцем	Довгі пальці в захопленні предмету участі не приймають		$R = F_I$	$\uparrow 0$	$\frac{\pi}{2} < \varphi < \pi$

Рис. 1.5. Класифікація способів і видів схоплення природної кисті

Латеральне (бічне) схоплення, можливість виконання якого зумовлена наявністю двох степенів рухливості вказаного суглобу, грає важливу роль у виконанні побутових і робочих функцій. Відтворення рухових можливостей цього суглобу в штучній кисті має велике значення для її функціональності.

## БІОМЕХАНІКА ПРОТЕЗУВАННЯ ВЕРХНІХ КІНЦІВОК

З позицій біомеханіки не існує абсолютно однакових людей, точно так, як одна і та ж людина не робить двох однакових кроків. Однак є обов'язкові загальні тенденції і закономірності, що відрізняють норму опорно-рухового апарату від патології. Знання цієї норми допомагає конкретно представляти задачі протезування і протезобудування.

Антропометрична норма визначає зв'язки між лінійними розмірами будь-якого сегменту тіла людини і її ростом. З цією метою вводиться величина, яка називається «парс» (П), що дорівнює  $1/56$  росту людини. У парсах виражені довжини і поперечники всіх сегментів тіла. Основні антропометричні характеристики дані на рис. 1.7.

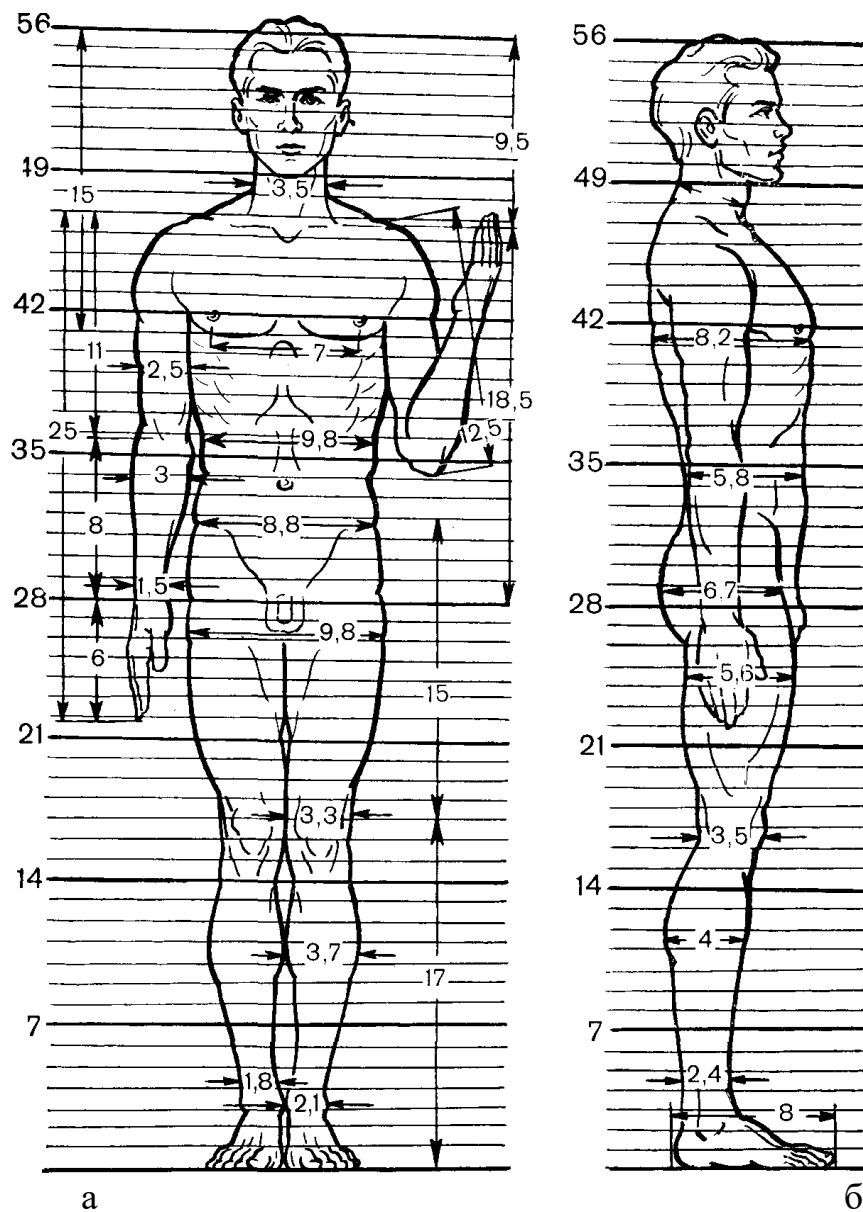
Цими відомостями можна скористатися, наприклад, для визначення довжини сегментів після двосторонньої ампутації нижніх кінцівок (рис. 1.8). Наприклад необхідно дізнатися довжину гомілки людини після двосторонньої ампутації. Для цього досить виміряти в сантиметрах довжину передпліччя з випрямленою кистю. Хай для прикладу ця довжина дорівнює 44 см, що становить 14 П. Тоді довжина гомілки, яка дорівнює 17 П, становить  $44 / 14 * 17 = 53$  см. Довжина стопи 8 П або  $44 / 14 * 8 = 25$  см.

Дані про величину ваги, втрачену внаслідок ампутації, приведені в таблицях 1.5, 1.6 і на рис. 1.9. Вони можуть бути використані для розрахунку схем побудови і доцільного розподілу ваги в протезах і ортезах.

Ампутація частини кінцівки або параліч спричиняє зміну положення центрів ваги на стороні ампутації і всього тіла. Ці зміни тим значніше, чим вищий рівень ампутації.

У цей час прийнята наступна класифікація рівнів ампутації:

- 1) кукса по Пірогову або Сайму, довга кукса гомілки (ампутовано  $1/6$  гомілки);
- 2) межа нижньої і середньої третини гомілки (ампутовано  $1/3$  гомілки);
- 3) половина гомілки (ампутовано  $1/2$  гомілки);
- 4) межа середньої і верхньої третини гомілки (ампутовано  $2/3$  гомілки);
- 5) коротка кукса гомілки (ампутовано  $5/6$  гомілки);
- 6) кукса по Грітті, або вилущення коліна (ампутована вся гомілка);
- 7) довга кукса стегна (ампутовано  $1/6$  стегна);
- 8) межа нижньої і середньої третини стегна (ампутовано  $1/3$  стегна);
- 9) половина стегна (ампутовано  $1/2$  стегна);
- 10) межа середньої і верхньої третини стегна (ампутовано  $2/3$  стегна);
- 11) коротка кукса стегна (ампутовано  $5/6$  стегна);
- 12) вилущення всієї ноги (екзартикуляція стегна).
- 13)



**Рис. 1.7. Антропометрична норма у чоловіків (а, б)**

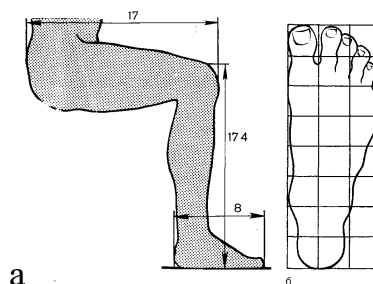
7-56 - парси; 6 - довжина кисті; 8 - довжина передпліччя; 11 - довжина плеча; 25 - довжина руки; 17 - довжина гомілки; 15 - довжина стегна; 1,8; 2,1; 3,7; 3,3; 9,8 - фронтальні поперечники сегментів; 2,4; 4; 3,5; 5,6; 6,7; 5,8; 8,2- сагітальні поперечники сегментів

Для визначення рівня ампутації необхідно порівняти довжину кукси з довжиною відповідного сегменту. Довжину гомілки вимірюють від зовнішнього виростка стегна до підлоги (коліно-підлога), довжину стегна - від вершини великих рожен до вершини зовнішнього виростка стегна. Наприклад, при довжині головки 53 см і довжині кукси гомілки 16 см, рівень ампутації буде віднесений до межі середньої і верхньої третини гомілки.

**Таблиця 1.5**

**Координати центрів ваги (ріст людини 100%)**

Сегмент	Координати центрів ваги, %		
	X	Y	Z
Голова	0,00	0,00	93,48
Шия та тулуб	0,00	0,00	71,09
Голова, шия та тулуб	0,00	0,00	74,15
Плече	0,00	±10,66	71,74
Передпліччя	0,00	±10,66	55,33
Кисть	0,00	±10,66	43,13
Вся рука	0,00	±10,66	62,30
Стегно	0,00	±5,04	42,48
Голінь	0,00	±5,04	18,19
Стопа	3,85	±6,16	1,78
Вся нога	0,35	±5,16	31,67
Все тіло (ЗЦВ)	0,00	0,00	57,65

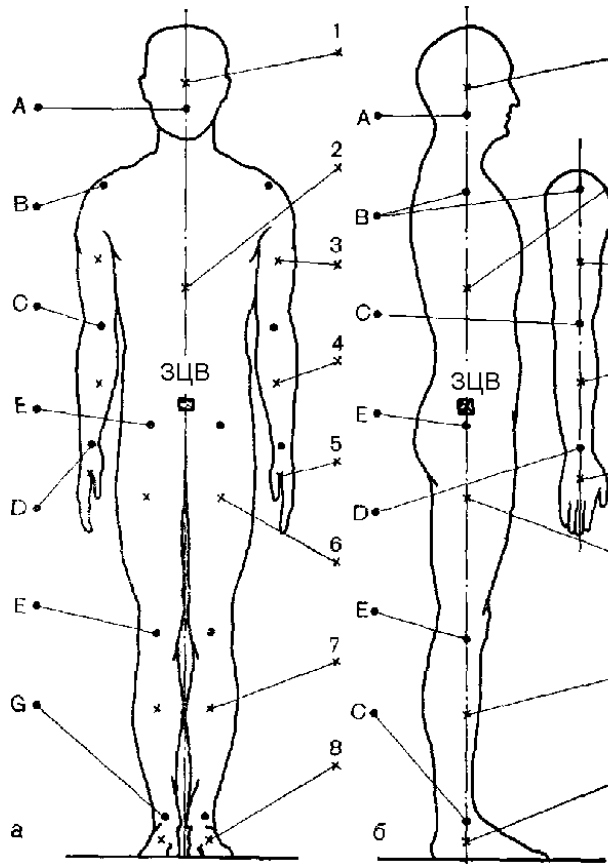


**Рис. 1.8. Антропометрична норма нижньої кінцівки людини**  
*а - нижня кінцівка; б - стопа. Розміри дані в парсах*

**Таблиця 1.6**

**Координати центрів ваги людини (ріст людини 100%)**

Суглоб	Позначення на рис. 1.9	Координати, %		
		X	Y	Z
Основа черепа біля I хребця	A	0,00	0,00	91,23
Плечовий	B	0,00	±10,66	81,16
Ліктювий	C	0,00	±10,66	62,20
Променезап'ястний	D	0,00	±10,66	46,21
Кульшовий	E	0,00	±5,04	52,08
Колінний	F	0,00	±5,04	28,44
Гомілкоступневий	G	0,00	±5,04	3,85



**Рис. 1.9. Розташування центрів суглобів (позначені латинськими буквами) і центрів ваги (позначені цифрами) в сегментах тіла людини**

Для ілюстрування того, як зміщується ЗЦВ в результаті ампутації, приводимо дані для двох рівнів ампутації при рості людини 170 см: при половині гомілки ЗЦВ зміщується в сторону ноги, що збереглася, на 8 мм і вгору на 45 мм, при половині стегна - в сторону здорової ноги на 13 мм і вгору на 79 мм.

Положення ЗЦВ змінюється також внаслідок атрофії кінцівки внаслідок паралічу. Наприклад, при атрофії, що дорівнює 0,7 (відношення ваги сегменту паралізованої кінцівки до ваги сегменту здорової кінцівки) у людини, ріст якої 170 см, зсув у бік здорової ноги становитиме 4 мм, вгору - 2 см. Ці відомості показують, як істотно змінюються інерційні характеристики тіла людини внаслідок ампутації або паралічу.