

Лекція № 4.

## Біомеханічні особливості м'язового скорочення

### 1. Біомеханіка м'язового скорочення. Основні біомеханічні показники роботи м'яза.

Як уже підкреслювалось, живий скелетний м'яз людини – надзвичайно складне утворення: він демонструє свої механічні характеристики *лише у випадку його підключення до системи кровообігу та центральної нервової системи*, причому зовнішня подібність його поведінки до механічних властивостей неживих матеріалів обумовлена зовсім іншими і набагато складнішими внутрішніми причинами.

Тому говорити про традиційні *механічні властивості* матеріалів (як то пружність, твердість в'язкість, міцність, текучість і т.ін.) відносно живих м'язів людини – просто некоректно (порівняйте: говорити про міцність чи текучість комп'ютера або твердість чи міцність на розрив електронних деталей).

У біомеханіці розглядають два *основні біомеханічні показники роботи м'яза: силу тяги* на його кінцях та *швидкість його скорочення*.

*Основна функція м'язів* – це перетворення хімічної енергії макроергічних сполук у механічну роботу (так звана *механо-хімічна реакція*). Скорочення м'язів відбувається внаслідок взаємодії актинових та міозинових міофіламентів. Активатором механохімічної реакції є іони кальцію. Енергія для роботи поперечних мостиків молекул міозину постачається АТФ.

Розглядаючи будову скорочувальних елементів скелетного м'яза людини, можна зауважити, що він складається з окремих *м'язових пучків*, пучки – з *волокон* (клітин довжиною від кількох мм до 10-ти і більше см), а

волокна – з *міофібрил* – тонких ниток товщиною 2 мкм. Міофібрили поділяються на товсті нитки – молекули *міозину* і тонкі нитки – білкові молекули *актину*. Поперечні *z-мембрани* розділяють міофібрили на маленькі волокна – *саркомери* – елементарні утворення м'яза, що проявляють його властивість скорочуватись (приблизно на 20 %, або на 5 мкм).

Коли  $N$  саркомерів діють паралельно (див. рис.4.1), тоді:

$$F = F_{\text{сарк.}} \times N, \text{ а } V = V_{\text{сарк.}}$$

де  $F$  – сила тяги всього пучка;  
 $F_{\text{сарк.}}$  – сила тяги одного саркомера;  
 $V$  – швидкість скорочення всього пучка;  
 $V_{\text{сарк.}}$  – швидкість скорочення одного саркомера.



Рис. 4.1 Розрахункова схема "м'яза", утвореного з  $N$  саркомерів, що діють паралельно

Коли  $N$  саркомерів діють послідовно (див. рис.4.2), тоді:

$$F = F_{\text{сарк.}}, \text{ а } V = V_{\text{сарк.}} \times N$$



Рис.4.2. Розрахункова схема "м'яза", утвореного з  $N$  саркомерів, що діють послідовно.

Це дозволяє нам зробити висновок, що збільшення фізіологічного перетину м'яза приводить до зростання сили його тяги без зміни швидкості скорочення, і навпаки – збільшення довжини м'яза приводить до збільшення швидкості скорочення без зміни сили тяги.

## 2. Залежність сили тяги м'яза від його довжини

Практика показує, що найбільшу силу тяги м'яз проявляє при певній оптимальній довжині. Ця довжина називається *довжиною спокою*. Пояснюється це експериментальними даними, одержаними при вивченні скорочення м'язового волокна (див. рис.4.3):

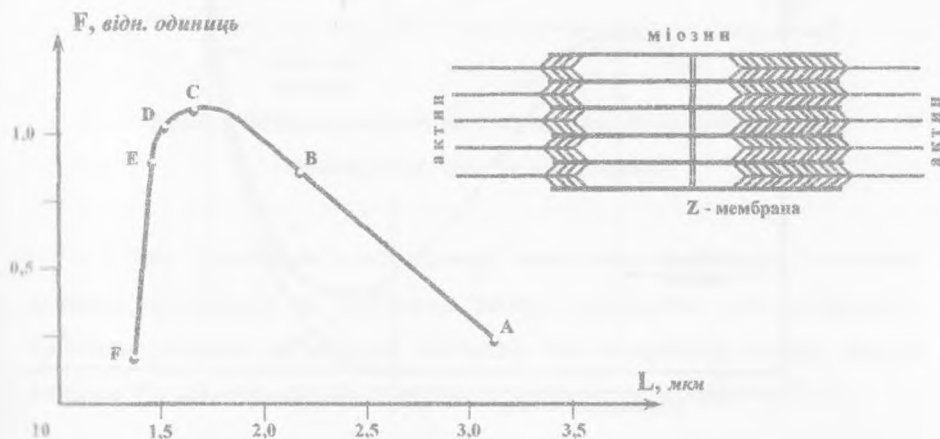


Рис.4.3. Вплив довжини саркомера на напруження, що розвивається окремими м'язовими волокнами та схема перекриття міозинових та актинових ниток при різній довжині саркомера (по А.Гордон, 1962).

При великій довжині м'яза (т.А) перекриття ниток актину та міозину мале, тому мала кількість мостиків, утворених між ними при активації м'яза, які "тягнуть" (а). При малій довжині м'яза (F) нитки актину впираються в Z-мембрани молекул міозину і сила тяги різко падає. Точки В, С, D і Е відповідають максимальному перекриттю актинових та міозинових ниток переважної більшості саркомерів м'яза; ця довжина м'яза і є *довжиною спокою*, яка відповідає максимальній силі тяги.

Крива а) на рис.4.4. і відображає силу активної тяги скелетного м'яза людини залежно від його довжини. Крива в) показує опір пасивному розтягту розслабленого м'яза зовнішньою силою. Крива с) є сумою кривих а) і в) -  $c) = a) + b)$  - і відображає реальну залежність сили тяги м'яза від його довжини.

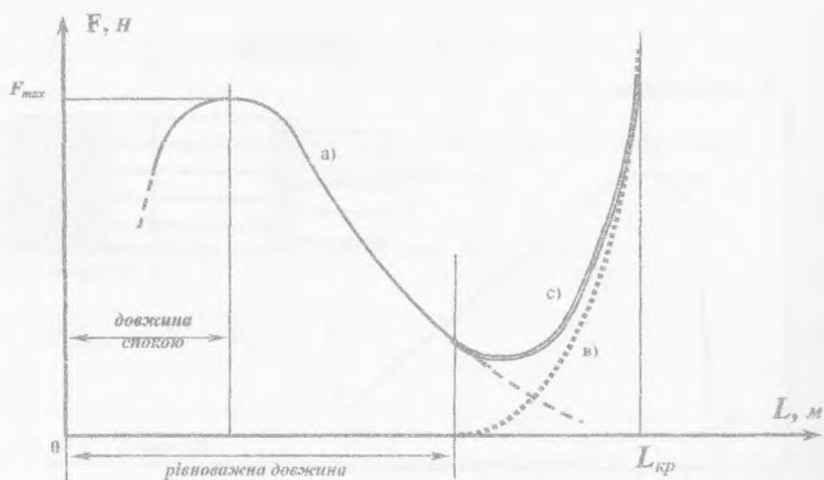


Рис.4.4. Залежність сили тяги м'яза від його довжини.

Чим більше у м'яза з'єднувальної тканини, тим менша її *рівноважна довжина* (довжина розслабеного м'яза, витягнутого в одну лінію), тому характер кривої с) може бути дещо іншим (див.рис.4.5.), що особливо характерне більшості м'язів нижніх кінцівок.

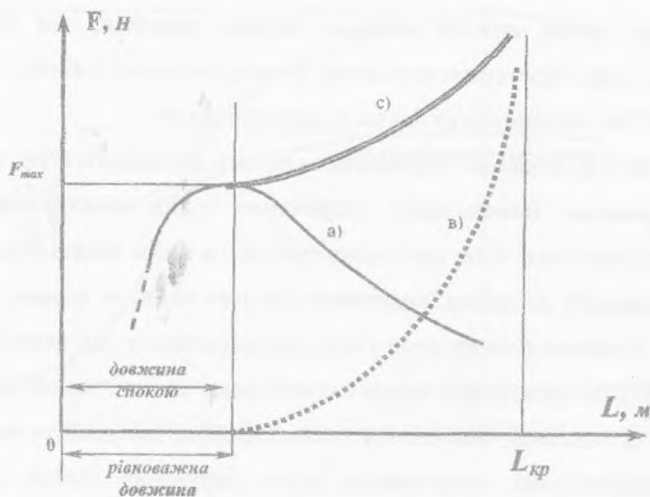


Рис.4.5. Залежність сили тяги м'язів з великою кількістю з'єднувальної тканини від довжини.

Тобто, збільшення максимальної сили тяги м'язів при їх великій довжині обумовлене не активною тягою саркомерів, а їх попереднім пасивним розтягом за рахунок зовнішніх сил (наприклад, силами інерції біолонок тіла спортсмена або інерцією спортивних приладів).

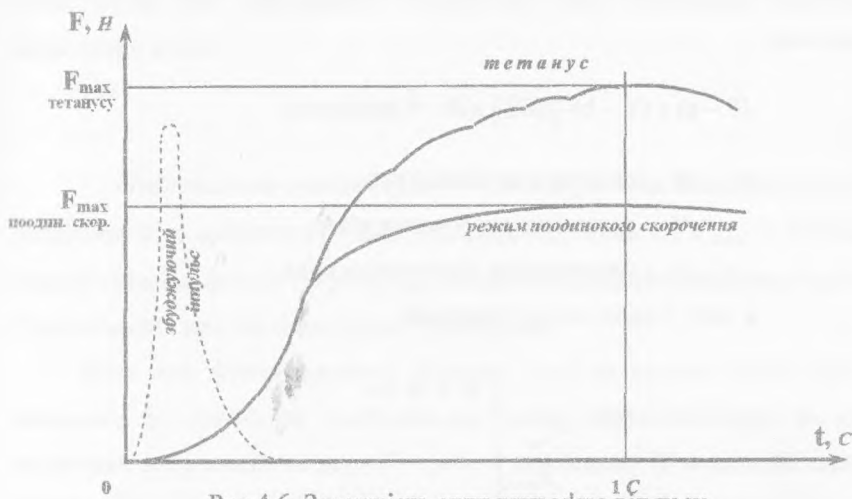
### 3. Залежність сили тяги м'яза від часу

Сила тяги на кінці м'яза з'являється не відразу після виникнення сили у скорочувальних елементах, а через деякий час, поки не розтягнуться *послідовні пружні компоненти* м'яза. Записані експериментально *електроміограми* (величина керуючих роботою м'язів електричних потенціалів) м'язів нижніх кінцівок бігунів показали, що електрична активність у них спостерігається ще до початку активної роботи – приблизно за 15-25 мС до постановки стопи на опорну поверхню.

На рис.4.6. показана залежність сили тяги скелетного м'яза людини від часу. У *режимі поодинокого скорочення* (один електричний імпульс збудження) сила тяги м'яза поступово зростає, а потім зменшується до нуля. Якщо збуджуючі імпульси подаються на м'яз один за одним, м'яз може розвивати набагато більшу силу тяги, скорочуючись у так званому *режимі тетануса*. Для досягнення максимальної сили чи найвищої швидкості її зростання ці імпульси повинні бути певної форми, частоти та амплітуди. У висококваліфікованих спортсменів якість керування своїми м'язами за рахунок досконалих збуджуючих імпульсів значно вища, ніж у новачків. Крім цього, їхні м'язи завдяки багаторічним тренуванням збуджуються значно краще, періоди розслаблення (а, значить, і витривалість спортсмена) зростають, м'язи включаються і виключаються з роботи дуже вчасно (таку злагоджену картину м'язової роботи деколи називають *м'язовим ансамблем*).

Звичайно максимальної сили тяги в режимі тетанічного скорочення скелетні м'язи людини досягають приблизно через 1 секунду після початку їх збудження. Тому при виконанні більшості фізичних вправ м'язи не досягають своєї максимальної сили тяги, а для виконання деяких дій, як уже згадувалось вище, м'язи починають активуватися завчасно перед виконанням

роботи. Для практики спорту вміння спортсмена швидко нарощувати силу тяги м'язів часто має більше значення, ніж максимальна сила.



Механічні показники скорочення м'яза залежать від зовнішнього навантаження, із збільшенням якого зростає латентний час реакції, зменшується величина скорочення, падає швидкість скорочення.

#### 4. Залежність сили тяги м'яза від швидкості його скорочення (крива Хілла)

Залежність сили тяги від швидкості скорочення м'яза надзвичайно важлива, адже добуток сили на швидкість дає потужність його роботи — основний показник при виконанні рухових дій *спринтерського характеру*.

Істотний внесок у вивчення згаданої залежності зробив відомий спортсмен-легкоатлет і вчений А.В.Хілл (1938 р.), іменем якого часто називають залежність "сила тяги – швидкість скорочення м'яза". Між цими показниками роботи м'яза – обернено-пропорційна залежність, яка може бути описана формулою:

$$(F - a) \times (V - b) - (F_0 - a) b = \text{constanta},$$

де  $F$  - сила тяги на кінці м'яза;

$V$  - швидкість скорочення м'яза;

$F_0$  - максимальна ізометрична сила;

$a$  та  $b = \text{const}$  - сталі величини.

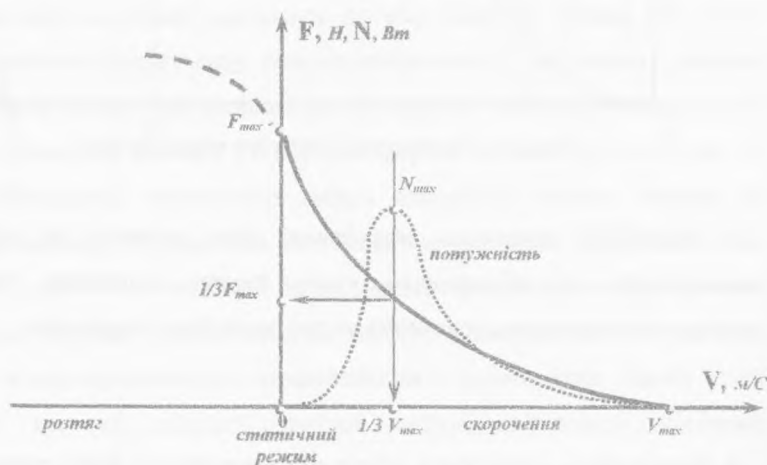


Рис. 4.7. Залежність сили тяги м'яза від швидкості його скорочення (крива Хілла)

Як видно з рис.4.7, максимальну потужність м'яз людини розвиває в режимі скорочення з швидкістю, що становить третину від максимальної. При цьому сила тяги на його кінцях також становить приблизно третю



частину від максимальної ізометричної сили. У випадку максимальної швидкості скорочення чи максимальної сили тяги м'яза (які, згідно кривої Хілла, ніколи не можуть виникнути одночасно), потужність його роботи рівна нулю, що пояснюється формулою для розрахунку потужності скорочення м'яза:

$$\vec{N} = \vec{F} \cdot \vec{V} \quad [Bm]$$

*Максимальна економічність м'язової роботи* спостерігається при швидкості його скорочення, рівній двадцяти відсоткам від  $V_{max}$ : у вказаному режимі співвідношення енерговитрат м'яза на виконання зовнішньої роботи і її розсіювання при теплоутворенні – найбільше.

Хоча для функціональних м'язових груп залежність сили тяги від швидкості їх скорочення (особливо на "краях" характеристики) не зовсім відповідає зображеній на рис.4.7, проте в основному її загальний характер зберігається, що активно використовують спортсмени, виконуючи різні фізичні вправи. Наприклад, велосипедисти-спринтери використовують частоту педалювання 135 – 150 об/хв, в той час як їх колеги-стайери надають перевагу частоті 56-87 об/хв, що при максимальній частоті педалювання на велоергометрі без навантаження (яка досягає 240 об/хв), якраз відповідає значенню 1/5 (20%) від  $V_{max}$ . Подібна картина спостерігається в інших видах спорту (плаванні, лижних перегонах, веслуванні тощо), де на різних дистанціях приходится вирішувати конкретно *спринтерські* або *стайерські* рухові завдання.

Розрахунок додаткових *енерговитрат на переміщення частин тіла* показує, що при частоті рухів, яка відповідає швидкості скорочення м'язів 1/3 від максимальної, потужність переміщення біологів тіла у більшості випадків значно перевищує потужність корисної зовнішньої роботи. Тому

спринтери стараються ні в якому разі не перевищувати частоту рухів, а велосипедисти-трековики вибирають завищене передавальне число трансмісії лише з метою підвищення ефективності стартових дій (внесок яких у загальний спортивний результат досягає 60%).