

## Лекція 7

## Біодинаміка рухових дій

## 1. Маса, сила тяжіння, вага та сила інерції.

Така властивість матеріального тіла, як маса, може проявлятися контактно (при безпосередній взаємодії тіл) або дистантно - при відштовхуванні чи притягуванні тіл на віддалі за рахунок електромагнітних, гравітаційних та інших сил). При контактній взаємодії тіл маса є мірою інертності тіла (інерційна маса) і вимірюється вона в кілограмах (кг). У випадку обертового руху тіла значення має не лише його маса, а й її локалізація відносно осі обертання, тому мірою інертності тіла в цьому випадку виступає момент інерції (див. лекцію 3):

$$J \approx \sum_{i=1}^n m_i \cdot r_i^2 \quad [\text{кг} \cdot \text{м}^2]$$

де  $m_i$  - елементарна маса, кг;

$r_i$  - віддаль маси  $m_i$  до осі обертання, м.

У випадку взаємодії притягування тіл силами гравітації (наприклад: притягування тіла спортсмена до Землі) говорять про гравітаційну масу, яка при швидкостях руху, менших від швидкості світла у вакуумі чисельно рівна інерційній масі, і також вимірюється в кілограмах. Сила притягування якогось тіла масою  $m$  до Землі визначається за формулою:

$$\vec{P} = m \vec{g} \quad [\text{Н}]$$

де  $\vec{P}$  - сила тяжіння, спрямована завжди до центра Землі та прикладена до тіла;

$\vec{g}$  - прискорення вільно падаючого тіла на даній довготі та широті (рівне  $9,78 \text{ м/с}^2$  на екваторі та  $9,82 \text{ м/с}^2$  на полюсах).

Таким чином, сила тяжіння, як міра притягування тіла до Землі, залежить від його маси (яка є незмінною) і його розташування відносно рівня моря (тіла слабше притягуються в горах і сильніше - в низинах) і не залежить від інших факторів (параметрів руху, опори і т. ін.).

Якщо тіло контактно взаємодіє з іншими тілами (наприклад, з верхньою або нижньою опорою), то воно діє на них силою ваги - вага прикладена до опори і в спокої рівна силі тяжіння, але спрямована в протилежну сторону.

При зміні швидкості руху тіла масою (це може бути розгін, гальмування, зміна напрямку руху тощо) воно проявляє свою інертність шляхом протидії зміні швидкості. Сила інерції, з якою воно

дія на розганяюче (гальмуєче або змінюєче напрям руху) тіло, чисельно рівна:

$$\bar{F}_{in} = -m \cdot \bar{a} \quad [H]$$

де  $\bar{F}_{in}$  - сила інерції, яка завжди спрямована проти прискорення та прикладена до *прискорюючого тіла*, Н;  
 $\bar{a}$  - прискорення самого тіла, м/с<sup>2</sup>.

Вага може бути більшою або меншою від сили тяжіння у випадку прискореного руху тіла або самої опори, так як виникають сили інерції і починається перевантаження або невагомість (повна чи часткова). У цьому випадку:

$$\bar{P} = m\bar{g} + \bar{F}_{in}$$

У неінерціальних системах відліку (які відносно Землі самі рухаються з прискореннями) для розрахунку сил згідно законів класичної механіки вводять поняття *фіктивної сили інерції*, яка в даному випадку вважається прикладеною не до прискорюючого тіла (яко пов'язане з тілом відліку), а до самого тіла, що змінює швидкість. Як приклад, можна розглядати рух веслара в академічному човні спочатку зі сторони спостерігача на березі, а потім зі сторони спостерігача, який знаходиться в тому ж човні.

## 2. Реакція опори, пружні сили.

Реакція опори - це міра протидії опори (верхньої або нижньої) тілу, яке взаємодіє з нею. Ця сила прикладена до *контактного* з нею тіла та спрямована протилежно його вазі. Так як вага залежить крім сили тяжіння ще й від руху самої опори, при розрахунках необхідно враховувати пружність самої опори, яка визначається а виразу:

$$\bar{F}_{np} = \Delta l \cdot k \quad [H]$$

де  $\bar{F}_{np}$  - пружна сила, Н;  
 $\Delta l$  - деформація опори в напрямку дії ваги взаємодіючого тіла, м;  
 $k$  - коефіцієнт жорсткості у тому-ж напрямку, Н/м.

Якщо опора пружна, то реакція опори зростає поступово, процес взаємодії з опором розтягується в часі, внаслідок чого максимальне значення прискорення зменшується, зменшується і вага взаємодіючого тіла порівняно з випадком взаємодії із жорсткою опорою.

Але при бігу по доріжці з пружним покриттям, м'язи ніг за рахунок збільшення часу взаємодії з опорою встигають розвинути більшу силу; крім цього, при відштовхуванні деформована опора надає тілу додатковий імпульс, що значно довантажує елементи рухового

апарату людини і в часом негативно впливає на стан здоров'я (особливо у вник спортсменів). Тому тренування на пружному покритті рекомендується чергувати з заняттями на покритих дерев'яною стружкою або м'яких ґрунтових доріжках.

Такий самий вплив (як на спортивний результат, так і на стан здоров'я спортсмена) відіграє пружність спортивного взуття, питанням вибору якого необхідно надавати особливу увагу.

Розрахунок сили дії опори на тіло людини (реакції опори) затруднений, так як він здійснюється з використанням методів випро: математики з метою імовірного моделювання динаміки взаємодії біологів тіла в часі.

### 3. Опір середовища рухові тіла. Сила Архімеда.

Всі тіла на Землі переміщуються у воді або в повітрі. Середовище завжди чинить опір рухові. Дослідження показали, що опір середовища рухові тіл змінюється при зниженні площі їх поперечного перерізу перпендикулярно до напрямку руху, наближенні форми тіл до форми кулі, закладування їх поверхні з також при зменшенні густини середовища (наприклад, повітря в високогір'ї, як у Мехіко чи Мадео). Тому у вираз для розрахунку лобового опору середовища рухові тіла  $R_x$  входять:  $\rho$  - густина середовища, кг/м<sup>3</sup>;  $S_x$  - лобова площа (переріз Міделя), м<sup>2</sup>;  $C_x$  - коефіцієнт обтічності (який залежить від форми і стану поверхні тіла та змінюється для спортивних приладів у широких межах - від 0,05 до 2,5) і визначається експериментально в аеродинамічній трубі;  $v^2$  - квадрат відносної швидкості переміщення тіла і середовища (враховується сила і напрямок вітру або течії), м/с:

$$\bar{R}_x = S_x \cdot C_x \cdot \rho \cdot v^2 \text{ [Н]}$$

(індекси "x" означають, що всі параметри вираховані відносно осі "x" - напрямку руху).

Так як густина води набагато перевищує густину повітря, опір рухові у воді значно більший, що і пояснює меншу швидкість плавання порівняно з іншими локомоціями.

Сила Архімеда визначає висновуючу дію середовища на тіло відповідно закону Паскаля:

$$F_{\text{Арх.}} = Q \cdot \rho \cdot \bar{g} \text{ [Н]}$$

де  $Q$  - об'єм витісненого середовища (фактично - об'єм газуреного тіла), м<sup>3</sup>.

#### 4. Сили тертя ковзання та спір кочення колеса.

Сила тертя ковзання не залежить від площі опори і розраховується за формулою:

$$\vec{F}_{\text{ТР}} = \vec{N} \cdot f_{\text{кобв}}.$$

де  $\vec{F}_{\text{ТР}}$  - сила тертя ковзання, ;  
 $\vec{N}$  - нормальна (перпендикулярна до поверхні ковзання складова притискаючої сили, ;  
 $f_{\text{кобв}}$  - коефіцієнт тертя ковзання.

Тертя опорою - максимальне значення сили тертя перед рушанням в місця - децю більше за силу тертя ковзання; це пояснюється тим, що в момент "ариву" тіла з місця, вийдуться елементи мікропрофілю поверхні контакту, що виникли під час їх взаємного встановлення.

Особливий інтерес викликає спір коченню коліс, який деколи невірно називають тертям кочення (такого явища в природі не існує).

Для нерухомого колеса розрахункова схема взаємодії сил показана на рис. 1 а); пляма контакту колеса на поверхні дороги показана нижче і має форму еліпса. Нижче показана також еліпра (картина розподілу на площині контакту) контактних сил. Напрямок дії рівнодійної сили - реакції опори - проходить через центр плями контакту (вісь) колеса з покриттям опорної поверхні і зрівноважує навантажуючу колесо силу:

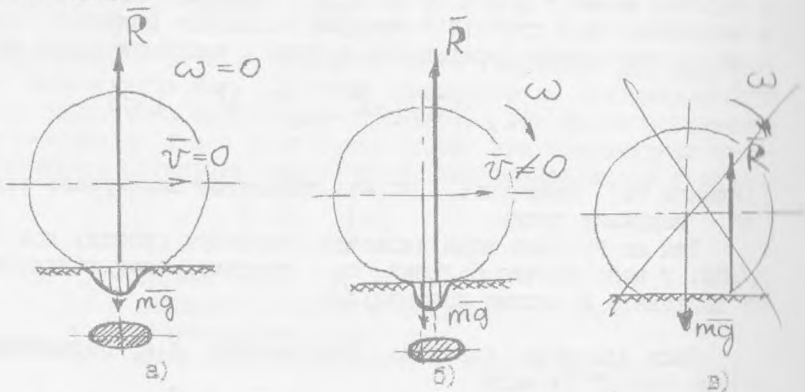


Рис. 1. Розрахункові схеми для визначення опору кочення колеса по горизонтальній поверхні: а) - в нерухомому стані; б) - при коченні колеса; в) - невірна розрахункова схема, що часто зустрічається в літературі.

При коченні колеса (як підтвердила швидкісна зйомка зняту процесу кочення колеса по прогарній поверхні), ділянки шни, які відриваються від дороги в задній частині плями контакту, за раху-

нок демп- фужних властивостей зуми та зістерезижних втрат, не витягають повернутися у початкове положення (шина приймає початкову форму не відразу, а через деякий невеликий проміжок часу), внаслідок чого центр плями контакту (лінія дії рівнодійної реакції опори) незначно зміщується вперед за напрямком руху центра колеса, що викликає гальмівний момент реакції опори відносно його осі обертання. Величина цього гальмівного моменту тим більша, чим товща шина, чим більший її прогин (тобто, гальмівний момент залежить від жорсткості шини і тиску повітря в ній).

В. Зовнішні та внутрішні сили, що діють на тіло спортсмена при виконанні фізичних вправ.

При визначенні, яка з сил, прикладених до тіла спортсмена, є зовнішніми (тобто адатнес змінити імпульс тіла та його енергію), а яка - внутрішньою, необхідно з'ясувати: наслідком дії якого тіла вона є. Зовнішньою буде лише така сила, дія якої викликана іншим тілом, що не входить до складу тіла, яке розглядається. Це-ж правило розподілу сил на зовнішні та внутрішні стосується і біомеханічної системи тіл (наприклад, тіла спортсмена, яке ми умовно розділяємо на біоданки: голову, тулуб, плечі, передпліччя, стегна і т.д.).

Тому, по відношенню до тіла людини, сумарна сила тяжіння, яка викликана гравітаційним притягуванням Землі, реакція опори, спір рухові, дія інших тіл (суперників, партнерів, тренера, м'яча тощо) - зовнішні сили. Зате активні м'язові тяги, сили пружності і тертя в самому організмі, дія сили інерції біоданок, що рухаються з прискоренням, на сусідні біоданки, дія ваги одних біоданок на інші і т.д. - внутрішні по відношенню до біомеханічної системи сили.

Якщо розглядати рухи якоїсь окремої біоданки, наприклад, гомілки, то тяги м'язів, які відносяться до стегна, силу тяжіння, прикладену до гомілки, вагу стопи, утримуючу дію стегна слід розглядати, як зовнішні по відношенню до гомілки сили, так як їх дія обумовлена тілами, що у поняття "гомілка" не входять.

Таким чином, одні і ті-ж сили можуть бути і зовнішніми, і внутрішніми; у кожному конкретному випадку це залежить від того, які тіла ми виключили у біомеханічну систему, а які - не виключили.

Розподіл сил на зовнішні і внутрішні має велике значення при використанні теореми про зміну імпульсу тіла (мільності руху) механічної системи  $K$  - міри механічного руху тіла, яка рівна:

$$\bar{K} = m\bar{v} \quad [кг \cdot м/с] \quad \text{при поступальному}$$

$$\bar{K} = J\bar{\omega} \quad [кг \cdot м^2/с] \quad \text{при обертальному}$$

Зміна імпульсу механічної системи можлива лише за рахунок зовнішніх сил. Наслідок з теореми: при рівності нулю головного вектора і головного моменту (алгебраїчної суми векторів і моментів) зовнішніх сил, імпульс механічної системи залишається незмін-

#### 4. Сили тертя ковзання та опір кочення колеса.

Сила тертя ковзання не залежить від площі опори і розраховується за формулою:

$$\bar{F}_{\text{тр}} = \bar{N} \cdot f_{\text{ковз}}.$$

де  $\bar{F}_{\text{тр}}$  - сила тертя ковзання, ;  
 $\bar{N}$  - нормальна (перпендикулярна до поверхні ковзання складова притискаючої сили, ;  
 $f_{\text{ковз}}$  - коефіцієнт тертя ковзання.

Тертя спокон - максимальне значення сили тертя перед рушенням в місці - дещо більше за силу тертя ковзання; це пояснюється тим, що в момент "ариву" тіла з місця, руйнуються елементи мікропрофілю поверхонь контакту, що виникли під час їх взаємного встановлення.

Особливий інтерес викликає опір коченню колеса, який деколи невірно називають тертям кочення (такого явища в природі не існує).

Для нерухомого колеса розрахункова схема взаємодії сил показана на рис. 1 а); пляма контакту колеса на поверхні дороги показана нижче і має форму еліпса. Нижче показана також еліпра (картина розподілу на площині контакту) контактних сил. Напрямок дії рівнодійної сили - реакції опори - проходить через центр плями контакту (вісь) колеса в напрямку опорної поверхні і зрівноважує навантажуючу колесо силу:

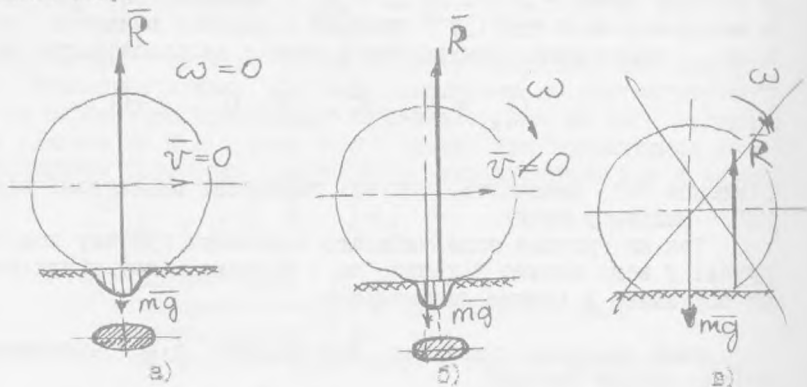


Рис. 1. Розрахункові схеми для визначення опору кочення колеса по горизонтальній поверхні: а) - в нерухомих стані; б) - при коченні колеса; в) - невірна розрахункова схема, що часто зустрічається в літературі.

При коченні колеса (що підтвердила швидкісна зйомка зняту процесу кочення колеса по прозорій поверхні), ділянки шини, які відриваються від дороги в задній частині плями контакту, за раху-

нок демп-функцій властивостей зуми та зістерезисних втрат, не встигають повернутися у початкове положення (шина приймає початкову форму не відразу, а через деякий невеликий проміжок часу), внаслідок чого центр плями контакту (лінія дії рівнодійної реакції опори) незначно зміщується вперед за напрямком руху центра колеса, що викликає гальмівний момент реакції опори відносно його осі обертання. Величина цього гальмівного моменту тим більша, чим товща шина, чим більший її прогин (тобто, гальмівний момент залежить від жорсткості шини і тиску повітря в ній).

### 5. Зовнішні та внутрішні сили, що діють на тіло спортсмена при виконанні фізичних вправ.

При визначенні, яка з сил, прикладених до тіла спортсмена, є зовнішньою (тобто адатною аніміти імпульсу тіла та його енергію), а яка - внутрішньою, необхідно з'ясувати: наслідком дії якого тіла вона є. Зовнішньою буде лише така сила, дія якої викликана іншим тілом, що не входить до складу тіла, яке розглядається. Це ж правило розподілу сил на зовнішні та внутрішні стосується і біомеханічної системи тіл (наприклад, тіла спортсмена, яке ми умовно розділяємо на біолоанки: голову, тулуб, плечі, передпліччя, стегна і ін.).

Тому, по відношенню до тіла людини, сумарна сила тяжіння, яка викликана гравітаційним притягуванням Землі, реакція опори, опір рухові, дія інших тіл (суперників, партнерів, тренера, м'яча тощо) - зовнішні сили. Зате активні м'язові тяги, сили пружності і тертя в самому організмі, дія сили інерції біолоанок, що рухаються в прискоренням, на сусідні біолоанки, дія ваги одних біолоанок на інші і ін. - внутрішні по відношенню до біомеханічної системи сили.

Якщо розглядати рухи якоїсь окремої біолоанки, наприклад, голіжки, то тяги м'язів, які відносяться до стегна, силу тяжіння, прикладену до голіжки, вагу стопи, утримувачу дію стегна слід розглядати, як зовнішні по відношенню до голіжки сили, так як їх дія обумовлена тілами, що у пов'язанні "голіжка" не входять.

Таким чином, одні і ті-ж сили можуть бути і зовнішніми, і внутрішніми; у кожному конкретному випадку це залежить від того, які тіла ми виключили у біомеханічну систему, а які - не виключили.

Розподіл сил на зовнішні і внутрішні має велике значення при використанні теорем про зміну імпульсу тіла (мількості руху) механічної системи  $\vec{K}$  - міри механічного руху тіла, яка рівна:

$$\vec{K} = m\vec{v} \quad [ка \cdot м/с] \quad \vec{K} = J\vec{\omega} \quad [ка \cdot м^2/с]$$

при поступальному при обертальному

Зміна імпульсу механічної системи можлива лише за рахунок зовнішніх сил. Наслідок з теорем: при рівності нулю головного вектора і головного момента (алгебраїчної суми векторів і моментів) зовнішніх сил, імпульс механічної системи залишається незмін-



ним. З теореми слідує, що єдиною можливою рушійною силою при переміщенні тіла людини може бути зовнішня сила. При пересуванні на коні, мотоциклі, автомобілі, літаку тощо, а також спуску з гори на санях, лижах, велосипеді - рушійними силами є або контактні сили, прикладені з боку інших тіл (кінь, мотоцикл, автомобіль), або сила тяжіння.

Проте при бігу, ходьбі, плаванні, їзді на велосипеді і ін., а також в метаннях, спортивних іграх, однокорствах і ін., причиною руху є внутрішні відносно біомеханічної системи сили - активні м'язові тяги. Але обов'язковою умовою їх прояву, як рушійних сил, є наявність зовнішньої сили - реакції опори.

Необхідною умовою зміни величини і напрямку швидкості руху біомеханічної системи є також наявність зовнішньої сили, тому дослідчені гірськолижники, мотоциклісти, радисти намагаються постійно перебувати у контакті з трасою, здійснюючи випереджаючі дії, розгойдування спортивного приладу навколо вертикальної та бокових осей, виконуючи уступаючу м'язову роботу, використовуючи досконалі амортизатори тощо, бо лише у цьому випадку є можливість постійно контактувати з поверхнею траси, тобто ефективно гальмувати, розганятися і повертати, чого не можна зробити в безопорній фазі.

Помилково рахувати *рушійними* сили тertia в плямі контакту біомеханічної системи (колееса, вагтя, лижі) з опорою - в усіх перелічених випадках джерелом руху є м'язові тяги.