## Зміст

[§1. Механічний рух](#_Toc505335150)

[§2. Швидкість](#_Toc505335151)

[§3. Прискорення](#_Toc505335152)

[§4. Рівноприскорений прямолінійний рух](#_Toc505335153)

[§5. Шлях під час рівноприскореного прямолінійного руху](#_Toc505335154)

[§6. Рівномірний рух по колу](#_Toc505335155)

[§7. Додавання швидкостей](#_Toc505335156)

[§8. Перший закон Ньютона](#_Toc505335157)

[§9. Сила](#_Toc505335158)

[§10. Другий закон Ньютона](#_Toc505335159)

[§11. Імпульс](#_Toc505335160)

[§12. Третій закон Ньютона](#_Toc505335161)

[§13. Реактивний рух](#_Toc505335162)

[§14. Закон всесвітнього тяжіння](#_Toc505335163)

[§15. Вага і невагомість](#_Toc505335164)

[§16. Рух під дією сили тяжіння](#_Toc505335165)

[§17. Космічні швидкості. Рух планет і супутників](#_Toc505335166)

[§18. Сила тертя](#_Toc505335167)

[§19. Рівновага тіл](#_Toc505335168)

[§20. Взаємодія твердих, рідких і газоподібних тіл](#_Toc505335169)

[§21. Кінетична енергія](#_Toc505335170)

[§22. Робота](#_Toc505335171)

[§23. Потенціальна енергія](#_Toc505335172)

[§24. Закон збереження енергії](#_Toc505335173)

[§25. Механічні коливання і хвилі](#_Toc505335174)

## [§1. Механічний рух](#Зміст)

Будь-яку зміну в матеріальному світі, будь-яку взаємодію матеріальних тіл називають *рухом.* Найпростішою формою руху матерії є *механічний рух.* Механічним рухом нази­вають зміну положення тіла відносно ін­ших тіл.

### Кінематика

Розділ механіки, у якому розглядають рух тіл без з'ясування причин руху й причин зміни руху, називають *кінематикою.*

### Матеріальна точка

Якщо розміри рухомого тіла дуже малі по­рівняно з пройденою ним відстанню, то рух тіла можна описувати як рух точки. Рухоме тіло в таких випадках називають *матеріальною точкою.*

### Траєкторія руху. Шлях

Лінію, по якій рухається матеріальна точ­ка, називають *траєкторією руху.* Довжину s траєкторії називають *шляхом.*

### Переміщення

Векторякий з'єднує початкову й кінце­ву точки траєкторії, називають *переміщен­ням .*

Під час прямолінійного руху шлях *s* дорів­нює модулю переміщенняточки. Під час криволінійного руху модуль пере­міщенняне дорівнює пройденому шля­ху *s* (мал. 2.1).



Для опису руху матеріальної точки треба визначити її положення в просторі в будь-який момент часу.

### Координати. Тіло відліку. Система координат

Розміщення точки в просторі задається її *координатами.* Для визначення координат точки треба обов'язково вибрати спочатку *тіло відліку,* а потім *систему координат,* пов'язану з цим тілом.

### Система відліку

Тіло відліку, система координат і вибір по­чатку відліку часу утворюють *систему відліку.*

### Відносність механічного руху

Траєкторія руху, пройдений шлях і пе­реміщення залежать від вибору системи відліку. Іншими словами, *механічний рух відносний.*

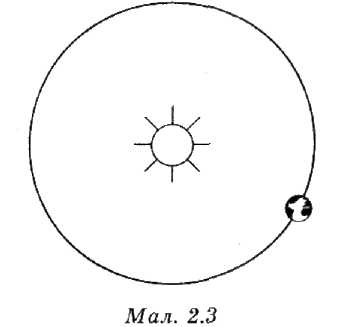
Наприклад, на питання, де перебуває Сон­це і як воно рухається, можна відповісти так.

Під час спостереження в системі відліку, пов'язаній з далекими галактиками (мал. 2.2), наше Сонце здійснює один оберт навколо центру нашої галактики — Чумацького Шляху — приблизно за 200 мільйонів років, його відстань від центру галактики приблиз­но 3-1020 м, швидкість руху — 250 км/с.



*Мал. 2.2*

Виберемо як тіло відліку Землю й початок координат розмістимо на поверхні Землі. *У* цій системі координат Сонце обертається по колу з радіусом 150мільйонів кіломет­рів, здійснюючи один оберт за добу. Швид­кість його руху близько 10 000км/с. Виберемо тепер Сонце як тіло відліку й зв'яжемо з ним систему координат. У цій системі координат Сонце нерухоме, а Зем­ля обертається навколо нього по колу ра­діусом 150 мільйонів кілометрів зі швид­кістю 30 км/с (мал. 2.3).



Яка з трьох відповідей про розміщення й рух Сонця правильна? Для кінематичного опису руху тіл усі системи відліку рівно­правні й усі результати опису правильні у вибраній системі відліку. Координати, траєкторія руху, переміщення, швидкість руху *відносні.* Немає абсолютних, справж­ніх значень координат і швидкостей тіл, во­ни залежать від вибору тіла відліку й сис­теми координат. *Механічний рух відносний.*

## [§2. Швидкість](" \l "Зміст)

На практиці часто треба знати не тільки те, де перебуває тіло в певний момент часу, але й як воно рухається.

Для кількісної характеристики процесу руху використовують поняття *швидкості руху.*

### Рівномірний рух. Швидкість рівномірного руху

Якщо в процесі руху тіло проходить за будь-які рівні інтервали часу однакові шляхи, то рух називають *рівномірним ру­хом.*

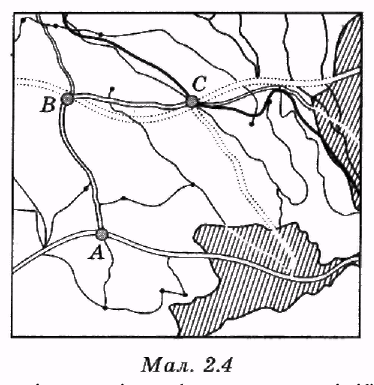
Під час рівномірного руху відношення пройденого шляху *s* до часу руху *t* є постійною величиною. Це відношення на­зивають *швидкістю v рівномірного руху:*

 (2.1).

Про координати тіла, що рухається рівно­мірно, можна дізнатися в будь-який момент часу, якщо відомі положення тіла в просторі в початковий момент часу *t=*0, траєкторія його руху й швидкість *v.* По­множивши швидкість *v* на час руху *t,* знай­демо пройдений шлях *$:*



Відрахувавши шлях *s* уздовж траєкторії від початкового розміщення в точці *А,* можна визначити положення тіла в точці *В* на його траєкторії в новий момент часу *і.* Таким чином автомобіліст визначає за кар­тою місце, у якому він перебуватиме через *t* годин руху з постійною швидкістю на ви­браному маршруті, тобто на відомій траєкторії *ABC* (мал. 2.4).



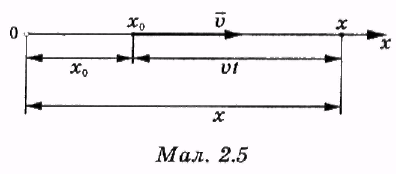
Якщо під час рівномірного прямолінійного руху вибрати таку вісь координат, яка б збігалася з напрямком руху тіла, то його положення в просторі однозначно визна­чається однією координатою *х.* Зміна коор­динатизі спливанням часу в цьому ви­падку дорівнює:

 (2.3),

а координату *х* в будь-який момент часу *t* визначають



за допомогою рівняння де— початкова координата в момент ча­су *t =*0 (мал. 2.5).



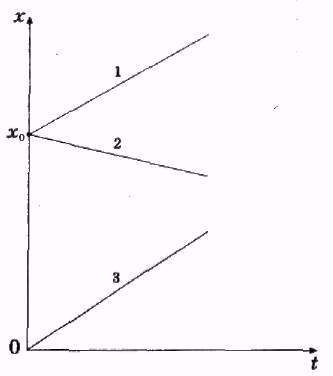
Якщо напрям осі *Ох* протилежний напря­мові руху тіла (мал. 2.6), його координату *х* в момент часу *t* визначають за допомо­гою рівняння





### Графік залежності координати від часу для рівномірного руху

На мал. 2.7 подано графіки залежності ко­ординати *х* від часу *t* для рівномірного ру­ху точки вздовж осі *x* зі швидкістю *v.*



*Мал. 2.7*

Графік 1 відповідає рухові точки зі швид­кістю *v* вздовж осі *х* у напрямі від початку координат, початкова координата Графік 2 відповідає рухові з тієї ж самої точкиу напрямі до початку координат. Графік 3 відповідає рухові вздовж осі *х* в напрямі від початку координат, початкова координата дорівнює нулю

### Нерівномірний рух

Рух тіл у реальних умовах ніколи не буває точно рівномірним. Рух, під час якого за рівні проміжки часу тіло проходить різні шляхи, називають *нерівномірним рухом.* Нерівномірний рух може характеризувати­ся середньою шляховою швидкістюза час руху *t* і миттєвою швидкістюв мо­мент руху *t.*

### Середня швидкість

*Середньою шляховою швидкістюназива­ють відношення шляху s до часу руху t:*

 **(2.6).**

Оскільки шлях і час є скалярні величини, середня швидкість— скалярна величина.

### Миттєва швидкість

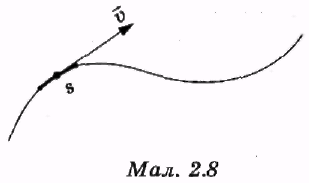
*Миттєвою швидкістюруху матеріальної точки в момент часу t називають відношення її переміщенняза дуже малий інтервал часубіля моменту часу t до інтервалу часу*



Оскільки переміщення величина векторна, а інтервал часускаляр, миттєва швидкість — величина векторна.

### Напрям вектора миттєвої швидкості

Вектор миттєвої швидкості  завжди на­прямлений по дотичній до траєкторії руху. Він указує напрям, по якому відбувався б рух тіла, якщо б з моменту часу *t* на нього припинилася дія будь-яких інших тіл (мал. 2.8).



### Одиниця вимірювання швидкості

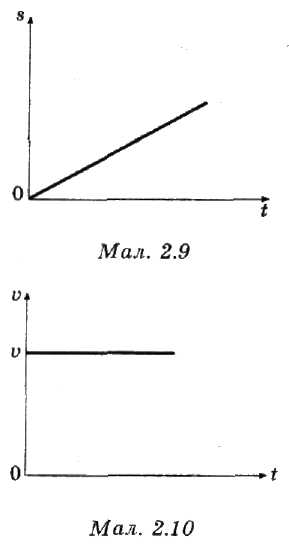
У Міжнародній системі одиницею вимірю­вання відстані є *метру* одиницею вимірю­вання часу — *секунда,* тому швидкість ви­мірюють у метрах за секунду:



### Графіки швидкості і шляху рівномірного руху

Графіком залежності швидкості *v* рівно­мірного руху від часу *t* — це пряма, пара­лельна до осі абсцис, по якій відлічують час *t* (мал. 2.9).

Графіком залежності шляху *s* рівномірного руху від часу *t* є пряма, що проходить че­рез початок координат (мал. 2.10).



Відношення ординати *s* до абсциси *t* на цьому графіку дорівнює швидкості у.

## [§3. Прискорення](" \l "Зміст)

Якщо під час руху тіла його миттєва швид­кість *v* змінюється зі спливанням часу за модулем або напрямом, то для повного опи­су руху тіла необхідно знати, як змінюєть­ся швидкість тіла зі спливанням часу.

### Прискорення

Для опису процесу зміни швидкості у фізи­ці використовують величину *прискорення. Прискоренням називають векторну фі­зичну величину, яка дорівнює відношенню зміни вектора швидкостідо інтервалу часу*, *за який відбулася ця зміна, за умо­ви, що цей інтервал часудуже малий:*

 (3.1).

З виразу (3.1) випливає, що під час вимі­рювання швидкості в метрах за секунду, а часу в секундах прискорення має наймену­вання метр за секунду в квадраті:



Під час прямолінійного руху зі зростаючою швидкістю вектормає такий самий напрям, що й вектороскільки Тому вектор прискорення збігається за напрямом з вектором швидкості Під час прямолінійного руху зі спадною швидкістю векторна прямлений проти­лежно до вектораоскільки. Век­тор прискореннянапрямлений протилеж­но до вектора швидкості Під час руху по криволінійній траєкторії вектор прискорення може бути напрям­лений під будь-яким кутом до вектора швидкості

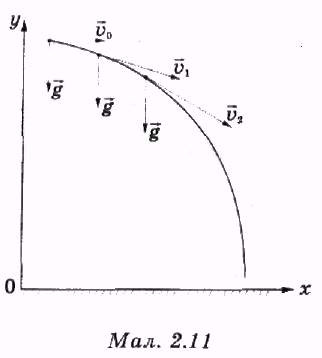
### Рівноприскорений рух

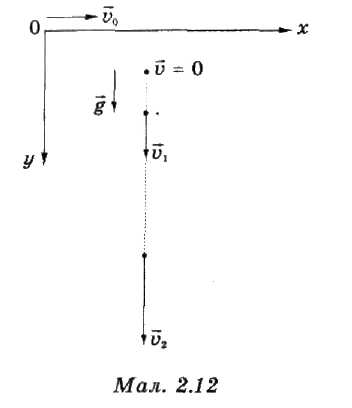
Рух з постійним за модулем і напрямом прискоренням називають *рівноприскореним рухом:*



## [§4. Рівноприскорений прямолінійний рух](" \l "Зміст)

Будь-який рівноприскорений рух шляхом вибору системи відліку можна розглядати як рівноприскорений прямолінійний рух. Наприклад, тіло, яке кинули горизонталь­но на висоті *h* з початковою швидкістю в системі відліку, що зв'язана із Землею, рухається рівноприскорено по параболі і його швидкістьзмінюється і за модулем, і за напрямом (мал. 2.11).



У системі відліку, що рухається зі швидкістювідносно Землі, те ж саме тіло рухається рівноприскорено пря­молінійно (мал. 2.12).

### Швидкість рівноприскореного прямолінійного руху

Під час рівноприскореного прямолінійного руху прискорення рухомого тіла дорів­нює відношенню зміни вектора швидкості  до інтервалу часу причому інтервал часу може бути будь-який, а не тільки ду­же малий:

Знайдемо зв'язок між швидкістю**і** при­скоренням  рівноприскореного прямо­лінійного руху. Якщо в початковий момент часу *t =* 0 швидкість тіла дорівнює **а** в момент часу *t* дорівнюєто



За умови рівноприскореного прямолінійно­го руху векториможуть бути співнапрямленими або протилежно напрямлени­ми. Коли векториспівнапрямлені, значення швидкості *v* в будь-який момент часу обчислюють за формулою:



Коли векториє протилежно напрямленими, значення швидкості *v* рівноприс­кореного прямолінійного руху обчислюють за формулою:



У цьому випадку при значеннях швидкість *v* з формули (4.7) одержимоз від'ємним знаком. Це означатиме, що нап­рям вектора швидкостіза умови протилежний напрямові векторапочат­кової швидкості.

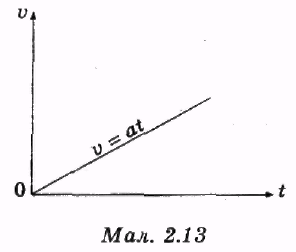
Якщо початкова швидкістьдорівнює ну­лю,то швидкість рівноприскореного прямолінійного руху обчислюють за фор­мулою:



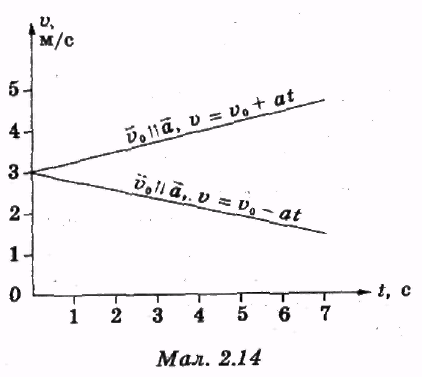
### Графік швидкості рівноприскореного прямолінійного руху

Графік залежності швидкості *v* рівноприс­кореного прямолінійного руху від часу *t* при початковій швидкостіподано на

мал. 2.13.

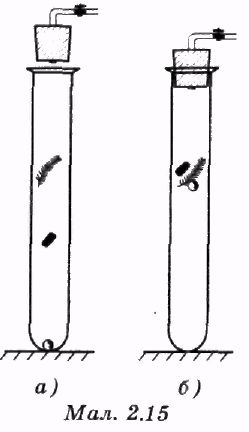


Графіки залежності швидкості *v* рівноприскореного прямолінійного руху від ча­су *t* при початковій швидкостідля випадків співнапрямлених і протилежно напрямлених векторів подано на мал. 2.14.



### Прикладом нерівномірного руху є падіння тіл на землю.

За результатами дослідів, під час падіння тіл у повітрі їхній рух не є рівноприскоре-ним рухом і швидкість різних тіл у процесі падіння змінюється з часом по-різному. Шматок свинцю, корок і пташине перо, що містяться в скляній трубці, заповненій повітрям, під час швидкого перевертання трубки падають на її дно не одночасно. Першим досягає дна трубки шматок свин­цю, потім корок і значно пізніше на дно падає перо (мал. 2.15а). Якщо насосом викачати повітря з трубки, то шматок свинцю, корок і перо під час пе­ревертання трубки досягають дна одночас­но (мал. 2.156).



### Вільне падіння

Падіння в пустоті називають *вільним па­дінням.*

### Прискорення вільного падіння

Усі тіла під час вільного падіння рухають­ся з однаковим прискоренням. *Прискорен­ня, з яким падають на Землю тіла в пус­тоті, називають прискоренням вільного падіння.* Прискорення вільного падіння по­значають літерою g.

У різних місцях біля поверхні земної кулі прискорення вільного падіння приблизно однакове й дорівнює



Якщо розрахунки не потребують високої точності, то вважають, що прискорення вільного падіння тіл біля поверхні Землі становить

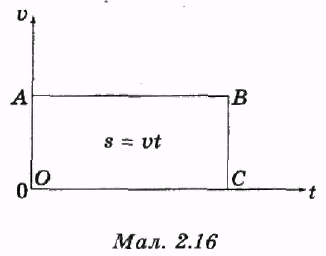
## [§5. Шлях під час рівноприскореного прямолінійного руху](" \l "Зміст)

Ми досить часто маємо справу на практиці з рівноприскореним прямолінійним рухом. Приблизно з однаковим прискоренням ру­хається потяг під час відходу зі станції або літак на злітній смузі.

Установимо зв'язок шляху s, пройденого під час рівноприскореного прямолінійного руху, із прискоренням *а* і часом *t* руху у випадку, коли початкова швидкість дорів­нює нулю.

Шлях і площа на графіку швидкості

Під час рівномірного руху графік залеж­ності швидкості *v* від часу *t* є прямою, па­ралельною до осі абсцис (мал. 2.16).



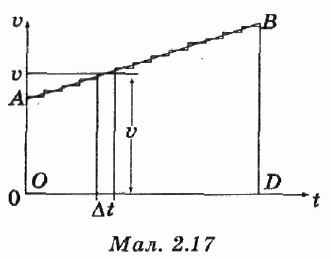
Шлях *$,* пройдений тілом за час *t* під час рівномірного руху зі швидкістю *v,* визна­чається виразом (2.2).

Якщо площу прямокутника *ОАВС* вирази­ти в одиницях добутку швидкості *v* на час t, то вона дорівнює:

 (5.1). Під час рівноприскореного прямолінійного

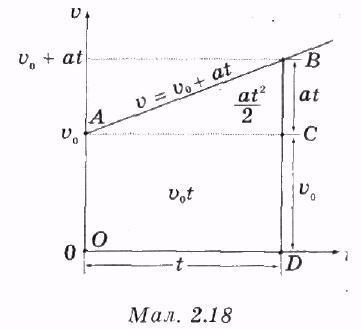
руху з початковою швидкістюспівнап-

рямленою з вектором прискореннягра­фіком залежності швидкості vвід часу *і* є пряма *АВ* (мал. 2.17).



Уявімо, що швидкість змінилася стрибкоподібно через малий інтервал часуі про­тягом цього інтервалу залишалася постій­ною, потім знову змінилася стрибком і т.д., як це зображено на мал. 2.17. Тоді рівноприскорений прямолінійний рух набли­жено замінюється послідовністю рівномір­них прямолінійних рухів. Шлях, пройде­ний за кожний інтервал часу під час рівномірного руху, дорівнює площі відпо­відного прямокутника на графіку залеж­ності швидкості від часу. Сума площ усіх прямокутників на графіку мал. 2.17 дорівнює площі трапеції *OABD.* Отже, в одиницях добутку *vt* площа під графіком швидкості рівномірного руху до­рівнює пройденому шляхові. Площа трапеції *OABD* дорівнює сумі площ прямокутника *OACD* і трикутника *ABC* (мал. 2.18):





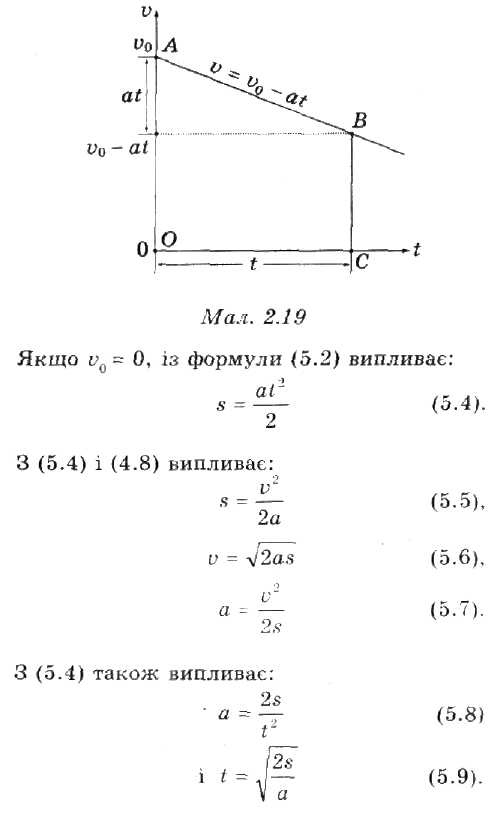
Тому шлях s, пройдений тілом за час *t,* виз­начається виразом:



### Зв'язок шляху, швидкості і прискорення під час рівноприскореного руху з початковою швидкістю, що дорівнює нулю

Якщо вектори початкової швидкості і прискоренняпротилежно напрямлені, то пройдений за час *t* шлях *s* дорівнює площі трапеції *ОАВС* на графіку залежності швидкості vвід часу t(мал. 2.19),

Використовуючи цей графік, можна одержати вираз:



## [§6. Рівномірний рух по колу](" \l "Зміст)

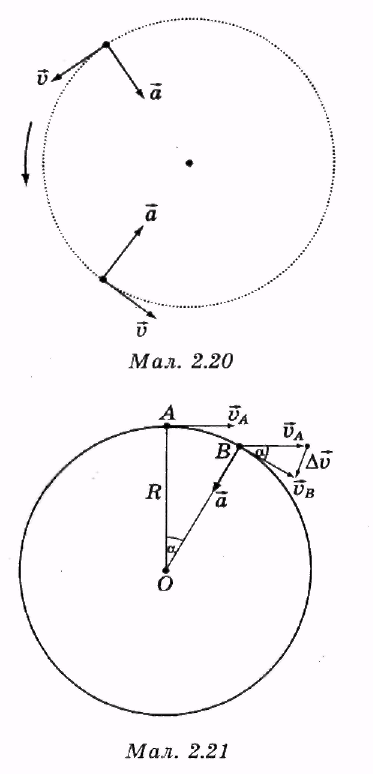
У природі й техніці часто можна спос­терігати рух тіл по колу з постійною за мо­дулем швидкістю. Приблизно так рухають­ся Місяць навколо Землі й Земля навколо Сонця.

Під час рівномірного руху матеріальної точки по колу вектор швидкостізміню­ється за напрямом, проте залишається по­стійним за модулем.

Оскільки напрям вектора швидкості змі­нюється з часом, рівномірний рух по колу є прискореним рухом.

### Доцентрове прискорення

Оскільки модуль вектора швидкості  не змінюється з часом, у будь-який момент ча­су вектор прискорення  перпендикуляр­ний до вектора швидкостій не має складової співнапрямленої з вектором *v* або протилежної до нього (мал. 2.20). Оскільки вектор прискоренняпід час рівномірного руху по колу в будь-який момент часу *t* на­прямлений до центра кола, його називають *доцентровим прискоренням.* Для того, щоб визначити значення вектора  доцентрового прискорення під час рівно­мірного руху по колу, знайдемо відношен­ня зміни вектора швидкостідо малого інтервалу часу  за який відбулася ця зміна (мал. 2.21).



Оскільки інтервал часу  дуже малий, кутміж векторами швидкостів точках *А* і *В* кола дуже малий, тому

 (6.1).

Кутміж векторами швидкості в точках *А* і *В* дорівнює кутуміж радіусами, що з'єднують точки *А і В* з центром кола. Цей кут дорівнює відношенню довжини дуги *АВ* до радіуса кола. Довжина дуги *АВ* дорівнюєотже



Використовуючи вираз (6.1) і (6.2), одер­жимо, що модуль доцентрового прискорен­ня *а* під час рівномірного руху по колу дорівнює:



Модуль вектора доцентрового прискорення *а* під час рівномірного руху тіла по колу не змінюється, але його напрям безперервно змінюється.

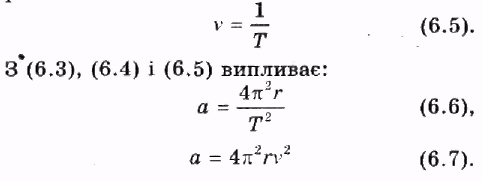
Тому рівномірний рух по колу не є рухом з постійним прискоренням, тобто не є рівноприскореним рухом.

### Період і частота

Інтервал часу, за який тіло здійснює один оберт по колу, називають *періодом обер­тання* й позначають літерою Т, Під час рівномірного руху по колу з ра­діусом r і швидкістю *v* період обертання *Т* можна визначити, поділивши довжину ко­ла на швидкість *v:*



Величину, обернену до періоду T назива­ють частотою обертання й позначають літе­рою



## [§7. Додавання швидкостей](" \l "Зміст)

### Класичний закон додавання швидкостей

Траєкторія, шлях і швидкість руху тіла є відносними величинами, що залежать від вибору системи відліку. Для розв'язання багатьох практичних задач потрібно знати, як пов'язані між собою значення швид­кості одного й того самого тіла в різних си­стемах відліку.

Експериментально встановлено, якщо тіло рухається зі швидкістю в одній системі відліку та є друга система відліку, що ру­хається зі швидкістювідносно першої си­стеми, то швидкістьруху тіла в другій системі відліку дорівнює сумі векторів



Цей закон називають *класичним законом додавання швидкостей.*

Так, човен, переміщуючись зі швидкістю  відносно води в річці, яка рухається зі швидкістю відносно Землі, має швид­кістьвідносно Землі, що дорівнює сумі векторів(мал. 2.22).



На відміну від швидкості, прискорення ру­ху тіла однакове в будь-яких системах від­ліку, що рухаються одна відносно одної з постійною швидкістю.

### Межі застосування класичного закону додавання швидкостей

Класичний закон додавання швидкостей має обмежену область застосовності. Він виконується з високим ступенем точності при значеннях швидкостей які на-

багато менші за швидкість світла *с* у ваку­умі, що дорівнює приблизно 300 000 км/с. Якщо швидкості тіла або системи

відлікублизькі до швидкості світла у ва­куумі, додавання швидкостей підлягає ре­лятивістському закону додавання швидкос­тей (54.1).

Автомобілі й потяги, літаки й космічні ра­кети, планети й штучні супутники Землі рухаються відносно Землі зі швидкостями, які значно менші від швидкості світла. То­му для опису їхнього руху під час перехо­ду із системи відліку, пов'язаної із Землею, до будь-якої іншої системи відліку, що ру­хається відносно Землі зі швидкістю можна користуватися класичним законом додавання швидкостей.

## [§8. Перший закон Ньютона](" \l "Зміст)

### Динаміка

Повний опис руху тіл на основі викорис­тання законів кінематики можливий у то­му випадку, коли відомо, як змінюються з часом швидкість і прискорення руху тіла. Зміну швидкості з часом можна визначи­ти, якщо відомий закон зміни прискорення з часом. Однак визначити прискорення тіла можна тільки на основі розгляду його взає­модій з іншими тілами.

*Розділ механіки, який вивчає закони взаємодії тіл, називають динамікою.* Спостереження за рухом тіл навколо нас показує, що звичайно тіла рухаються, поки вони зазнають впливу з боку інших тіл. Ав­томобіль після вимкнення двигуна незаба­ром зупиняється, м'яч після удару фут­боліста, прокотившись деякий час, також зупиняється.

Проте італійський учений *Галілео Галiлей,* спостерігаючи за рухом тіл, зробив принци­пово новий висновок. Він звернув увагу, що початкова швидкість тіла, що рухалося в різних умовах, змінюється по-різному. Камінь, який кинули з однаковою початко­вою швидкістю, по гладкій поверхні льоду проходить значно більший шлях до зупин­ки, ніж по поверхні піску. Із цих спостере­жень Галілей зробив висновок, що *швид­кість будь-якого тіла змінюється тільки в результаті його взаємодії з іншими тілами.*

### Закон інерції

У 1632 році Галілей сформулював закон інерції: *будь-яке тіло перебуває в спокої або рухається рівномірно й прямолінійно, якщо на нього не діють інші тіла або їхні дії компенсують одна одну.*

### Перший закон Ньютона

Великий англійський учений *Ісаак Нью­тон* зарахував закон інерції до основних законів механіки, тому закон інерції нази­вають *першим законом Ньютона, або пер­шим законом механіки.* Повністю ізолювати будь-яке тіло від дії інших тіл неможливо. Тому будь-який рух тіл, який ми спостерігаємо, можна вважати рівномірним прямолінійним лише наближено. Як тільки на тіло, що рухається зі змінною швидкістю по траєкторії будь-якої форми, припиняється дія інших тіл, то відповідно до закону інерції тіло рухається рівномір­но й прямолінійно по дотичній до траєкторії руху тіла.

### Інерція

Явище збереження швидкості руху тіла за відсутності зовнішніх впливів називають *Інерцією.*

Наочно демонструє прямолінійний рів­номірний рух тіла за інерцією шайба, яка рухається по льоду від удару по ній хокей­ною ключкою.

Прояви інерції добре знайомі кожному з власного життєвого досвіду. Наприклад, коли автобус різко гальмує, пасажир за інерцією й далі рухається вперед з тією са­мою швидкістю. Для того, щоб залишитися нерухомим відносно автобуса, він має до­класти певних зусиль, взаємодіючи з підло­гою автобуса й поручнями. Якщо автобус, рухаючись з великою швидкістю, робить поворот, пасажир і далі рухається рівно­мірно й прямолінійно в напрямі до бічної стінки автобуса.

Оскільки спокій і рух тіл відносні, то й за відсутності взаємодії з іншими тілами те саме тіло може перебувати в стані спокою в одній системі відліку та рухатися з приско­ренням в іншій системі відліку. Отже, закон інерції діє не в будь-яких сис­темах відліку.

### Інерціальні системи відліку

*Системи відліку, у яких діє закон інерції, називають інерціальними системами відліку.*

Під час досліду на поверхні Землі закон інерції діє з дуже високою точністю, тому зви­чайно системи відліку, пов'язані із Землею, уважають інерціальними системами відліку. Проте під час підвищення точності вимірю­вань у будь-якій з них виявляють відхилення від закону інерції. Явища, які суперечать пер­шому законові Ньютона, на Землі можна спо­стерігати тому, що Земля обертається навко­ло своєї осі й навколо Сонця.

## [§9. Сила](" \l "Зміст)

### Напрям вектора сили

Будь-яка взаємодія тіл спричинює зміну їхніх швидкостей, а мірою зміни швидкості є прискорення. Тому для кількісного опису дії одного тіла на інше можна вибрати ве­личину, прямо пропорційну до прискорен­ня тіла. Цю величину називають *силою.* Сила— *це векторна величина, прямо пропорційна до прискорення тіла*



*За напрям вектора силиберуть напрям вектора прискорення що виникає під*

*дією сили.*

### Одиниця сили

Якщо ми будемо діяти однаково, як нам здається, на різні тіла, то їхні прискорення можуть суттєво різнитися. Тому для визна­чення одиниці вимірювання сили не­обхідно вибрати певне тіло. У фізиці для визначення одиниці сили використовують будь-яке тіло масою 1 кілограм. *За одиницю вимірювання сили в Міжнарод­ній системі одиниць (СІ) беруть таку си­лу, під дією якої тіло масою 1 кілограм ру­хається з прискореннямЦю одини­цю називають ньютон(1Н):*

### Вимірювання сил

Якщо на тіло діють інші тіла, то виникнен­ня прискорення є не єдиним можливим ре­зультатом.

### Деформація

Поставимо на стіл візка й прикріпимо до нього один кінець пружини. Якщо потяг­нути за інший кінець пружини, то візок починає рухатися й рухається прискорено. Під час прискореного руху візка пружина розтягується, змінюються її форма й роз­міри. Зміну форми й розмірів тіл нази­вають *деформацією.*

### Сила пружності

Дослід показує, що інший можливий ре­зультат взаємодії тіл — *деформація тіл.* Сили, що виникають як результат деформації тіл, називають *силами пружності.* У нашому досліді причиною виникнення при­скорення візка була дія на нього сили пружності з боку деформованої пружини.

### Закон Гука

Як показує дослід, під час розтягування або стискання сталевої пружини сила пружності прямо пропорційна до дефор­мації пружини *х* (закон Гука):

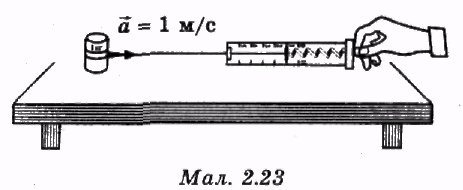


### Жорсткість тіла

Коефіцієнт *k* у формулі (9.1) називають *жорсткістю тіла* й виражають у ньютонах на метр (Н/м). Жорсткість залежить від розмірів тіла й матеріалу, з якого воно ви­готовлене. Знак мінус у законі Гука вказує, що сила пружності напрямлена протилежно до деформації тіла.

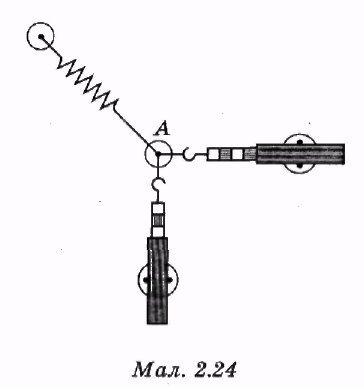
### Динамометр

Закон Гука використовують у приладах для вимірювання сил — динамометрах. Ос­новними деталями динамометра є сталева пружина, шкала й покажчик розтягування або стискання пружини. Для градуювання динамометра на його шкалі відзначають положення, які має покажчик за відсут­ності деформації пружини та при дії пру­жини на тіло масою 1 кг силою в 1 Н. З визначення одиниці виміру сили випливає, що тіло має рухатися з прискоренням Положення покажчика при наданні тілу масою 1 кілограм прискорення відповідає силі 2 Н і т. д. (мал. 2.23). Дія всіх інших сил на тіло під час такого досліду має бути компенсована.



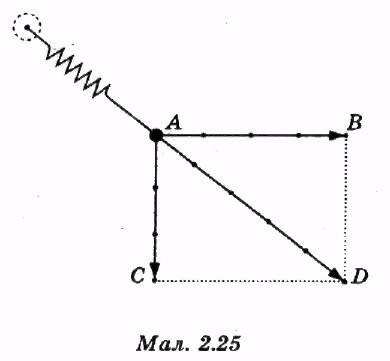
### Додавання сил

Використовуючи одну пружину й два дина­мометри, можна під час досліду перекона­тися, що додавання сил відбувається за за­гальним правилом додавання векторів. Закріпимо один кінець дружини на дошці. Спочатку прикріпимо до пружини два ди­намометри й потягнемо за них, розміщую­чи динамометри під кутом один до одного. При цьому пружина розтягується силами, які діють під кутом. Результатом їхньої дії є розтягання пружини до точки *А* (мал. 2.24).



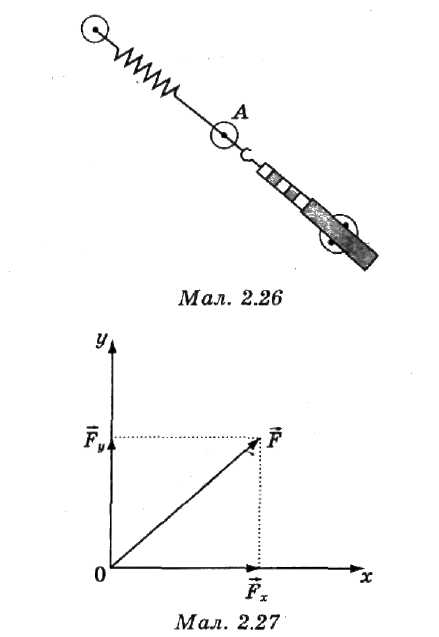
Відрахувавши показання динамометріві  відкладемо на дошці від точки *А* вздовж напрямку векторів відрізки і

 довжини яких пропорційні до значень сил(мал. 2.25).



Потім замість двох динамометрів прикріпи­мо до кінця пружини один динамометр і розтягнемо пружину до тієї самої точки *А* (мал. 2.26).

Користуючись правилом паралелограма, будь-який вектор силиможна уявити як рівнодійну двох векторів сил  прикладених до тієї самої точки тіла (мал. 2.27). Силиназивають складовими вектора силина напрямах Ох і *Оу.*



### Рівнодійна сила

Силу що дорівнює сумі сил знайденій за правилом додавання векторів, називають *рівнодійною сил* Рівнодійна двох сил, що мають однакові числові значення й напрямлені в протилежні боки, дорівнює нулю. Під дією таких сил, як і за відсутності сил, тіло перебуває в спокої або рухається рівномірно й прямолінійно. Про такі сили кажуть, що вони компенсують одна одну.

## [§10. Другий закон Ньютона](" \l "Зміст)

### Сила тяжіння

Розмістимо динамометр вертикально й до його гачка будемо підвішувати різні тіла. Розтягування пружини показує, що на всі тіла з боку Землі діє сила притягання. Цю силу називають *силою тяжіння.*

### Маса тіла

Підвісимо на гачок динамометра спочатку одне тіло, а потім інше, виготовлене з того самого матеріалу, але яке має вдвічі більший об'єм. Дослід свідчить, що на друге тіло діє у два рази більша сила тяжіння. Потім виміряємо силу тяжіння, що діє на тіла однакового об'єму, але які виготовлені з різних матеріалів. Дослід показує» що, наприклад, на алюмінієвий і сталевий ци­ліндри однакового об'єму діють неоднакові сили тяжіння. Отже, сила тяжіння, що діє на тіло, залежить не тільки від його об'єму. Фізичну величину, яка повністю визначає значення сили притягання тіла до Землі, назвали масою тіла.

*Фізичну величинуt до якої прямо про­порційна сила притягання тіла до Землі, називають масою тіла.*

### Кілограм

*За одиницю вимірювання маси беруть масу міжнародного еталона кілограма. Цю одини­цю вимірювання називають кілограм (1кг).* Тіло має масу 1кг, якщо на нього діє така сама сила тяжіння, яка діє в тому самому місці спостереження на міжнародний ета­лон кілограма.

### Вимірювання маси

Маси тіл можна порівнювати за допомогою рівнораменних терезів. Терези перебувають у стані рівноваги, якщо на їхніх шальках є тіла з однаковими масами. Якщо маса тіла на одній шальці терезів відрізняється від маси тіла на іншій шальці, то терези вихо­дять зі стану рівноваги. Маючи рівнора-менні терези й набір тіл з відомими значен­нями маси — гирями, можна визначити масу будь-якого тіла. Маса тіла дорівнює сумі мас гир, які зрівноважують це тіло на рівнораменних терезах.

### Залежність прискорення від маси тіла

Добре відомо, що під дією однакових сил різні тіла можуть набувати різних приско­рень. Від чого ще» крім значення діючої си­ли, залежить прискорення тіла? Дослід свідчить, що *єдиною характеристикою тіла, від якої залежить прискорення під час дії однакових сил, є маса тіла.* Під час дії однакових сил прискорення *а* тіла обернено пропорційне до його маси *т:*



### Другий закон Ньютона

За визначенням, сила пропорційна до при­скорення тіла. Отже, *прискорення руху тіла прямо пропорційне до діючої на нього сили й обернено пропорційне до маси тіла.* Це твердження називають *другим законом Ньютона,* або *другим законом механіки:*



Використовуючи другий закон Ньютона, можна розв'язати три види практичних за­дач. Якщо відомі значення сили *F* і маси *т* тіла, то можна визначити прискорення ру­ху тіла. Коли відомі значення маси тіла й прискорення, то можна знайти силу, яка викликає прискорення:



За відомими значеннями сили й прискорен­ня можна знайтимасу тіла:

### Маса як міра інертності тіла

Дослід свідчить, що під дією сил тіла не можуть миттєво змінювати свій стан спо­кою або руху. Цю властивість тіл назива­ють *інертністю.*

Із другого закону Ньютона випливає, що різні тіла під дією однакових сил рухають­ся з різним прискоренням. Що більша маса тіла, то повільніше змінюється швидкість ті­ла. Отже, *маса є мірою інертності тіла.* Таким чином, маса тіла одночасно є мірою двох властивостей тіл: властивості взаємо­діяти з іншими тілами за допомогою сил тяжіння та мірою інертності тіла.

### Межі застосування другого закону механіки

У системі відліку, пов'язаній із парашути­стом, який вистрибнув з літака, Земля й усе, що є на ній, рухається вгору з приско­ренням вільного падіння. Але насправді не­має такої сили, яка під час вистрибування парашутиста діє на Землю й викликає її прискорений рух угору. Отже, другий заакон механіки не діє в системі відліку, пов'язаній із парашутистом, що рухається прискорено. *Другий закон механіки діє тільки в інерціальних системах відліку.*

## [§11. Імпульс](" \l "Зміст)

Розглянемо, від чого залежить зміна швид­кості тіла, коли на нього діє постійна сила. Під дією постійної сили  тіло масою *т* рухається з постійним прискоренням



Зміна швидкості тілаза інтервал часу *t* дорівнює:

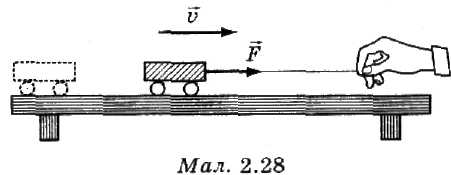


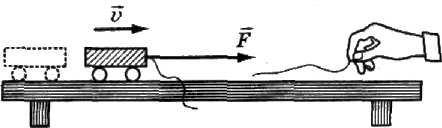
Вираз (11.1) показує, що зміна швидкості руху тіла пропорційна не тільки до сили, але й до часу її дії.

Якщо зробити різкий ривок, то нитка обри­вається, а швидкість візка майже не збіль­шується (мал. 2.29).

Якщо поставити на демонстраційний стіл візок, прив'язати до нього тонку нитку й тягнути за неї з невеликою силою, візок по­чинає рухатися і рухається з усе більшою швидкістю

(мал. 2.28).



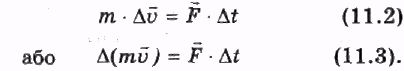
*Мал.* 2.29

Обрив нитки показує, що сила, яка діє на візок, була в другому досліді більшою, ніж у першому, проте швидкість візка майже не змінилася через малий час дії сили.

### Імпульс сили

*Фізичну величину, що дорівнює добуткові сили F на часїї* *дії, називають імпуль­сом сили.*

Ми одержали, що зміна швидкості тіла прямо пропорційна до імпульсу сили й обернено пропорційна до маси тіла. З (11.1) випливає, що добуток зміни швидкості тіла на його масу дорівнює імпульсу сили:



### Імпульс тіла

З (11.3) випливає, що є фізична величина, яка однаково змінюється в усіх тіл під час дії однакових сил протягом однакового ча­су. Цю *фізичну величину, що дорівнює до­буткові маси тіла на його швидкість, на­зивають імпульсом тіла.*

### Кількість руху

Зміна імпульсу тіла дорівнює імпульсові си­ли, яка викликає цю зміну. Імпульс тіла є кількісною характеристикою руху тіл. Інко­ли імпульс тіла називають *кількістю руху.* Імпульс тіла позначають латинською літе­рою

*За одиницю імпульсу в Міжнародній сис­темі одиниць беруть імпульс тіла масою І кг, що рухається зі швидкістю 1 м/с:*



Коли взаємодіють два тіла, швидкість та імпульс кожного з них змінюється. Як по­казує дослід, сума векторів імпульсів тіл ідо їхньої взаємодії завжди дорівнює сумі векторів імпульсів тіл після

взаємодії:



### Закон збереження імпульсу

Сталість суми векторів імпульсу під час будь-яких взаємодій тіл є універсальним законом природи. Цей закон є одним з ос­новних або *фундаментальних законів* фі­зики й називають його *законом збереження імпульсу.*

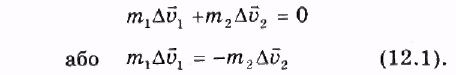
Він діє не тільки у випадку взаємодії двох тіл, але й під час взаємодії будь-якої кіль­кості тіл:

*В інерціальній системі відліку за відсут­ності зовнішніх сил сума векторів імпуль­сів тіл залишається постійною під час будь-яких взаємодій тіл між собою.* Якщо сума векторів імпульсів тіл, що взаємодіють, залишається постійною, то сума змін імпульсів тіл, які взаємодіють, дорівнює нулю:

## [§12. Третій закон Ньютона](" \l "Зміст)

Використовуючи закон збереження імпуль­су, розглянемо детальніше випадок взаємо­дії двох тіл. Якщо в результаті взаємодії двох тіл з масамиїхні швидкості

змінилися відповідно на, то на основі закону збереження імпульсу (11.7) ви­конується рівність:

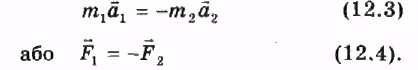


Поділимо останню рівність на інтервал ча­сувзаємодії тіл:



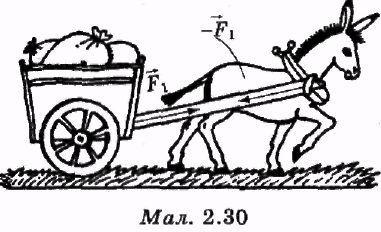
Якщо інтервал часувзаємодії тіл дуже малий, то цю рівність можна записати у

вигляді:



### Третій закон Ньютона

*Під час взаємодії двох тіл вектори сил, що діють на кожне тіло, рівні за модулем і на­прямлені вздовж однієї прямої в проти­лежні сторони* (мал. 2.30). Це твердження називають *третім законом Ньютона,* або *третім законом механіки.*



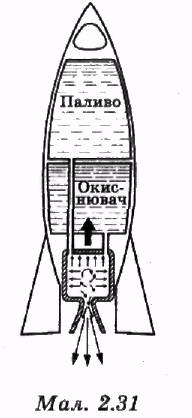
Третій закон Ньютона формулюють і так: *будь-якій дії є рівна й протилежно напрям­лена протидія.*

Сили дії і протидії прикладені до різних тіл і мають однакову фізичну природу. Оскільки закон збереження імпульсу діє тільки в інерціальних системах відліку, то й третій закон Ньютона діє тільки в інерціальних системах відліку.

## [§13. Реактивний рух](" \l "Зміст)

Використовуючи третій закон Ньютона й закон збереження імпульсу, можна розра­хувати зміну швидкості взаємодій них тіл і діючих сил без обчислення прискорень. Це дозволяє розв'язати багато практичних за­дач, які не можна розв'язати іншими мето­дами. Наприклад, застосування закону збе­реження імпульсу дозволяє виконувати всі необхідні розрахунки для використання ре­активних двигунів.

### Ракета

У рідинній ракеті є запас рідкого палива, окиснювач, насоси й камера згоряння. За допомогою насосів паливо й окиснювач надходять до камери згоряння. Коли пали­во згоряє, із сопла ракети виходять газо­подібні продукти горіння, нагріті до висо­кої температури (мал. 2.31). Швидкість витікання газів із сопла рідинної ракети досягає 3-5 км/с.

Під час дії двигуна протягом короткого інтервалу часуіз сопла ракети викида­ються зі швидкістю *v* гарячі гази з масою  Ракета й гази, які викидає її двигун, взаємодіють між собою. На основі закону збереження імпульсу за відсутності зовніш­ніх сил сума векторів імпульсів взаємодійних тіл залишається постійною. До по­чатку роботи двигунів імпульс ракети й палива дорівнював нулю, отже, і після ввімкнення двигунів сума векторів імпуль­су ракети та імпульсу газів, що витікають, дорівнює нулю:



де М — маса ракети, — зміна швидкості ракети, — маса викинутих газів,

 — швидкість витікання газів. Звідси для векторів імпульсу одержуємо:



а для зміни швидкості ракети ,маємо:



Цю формулу можна застосувати для обчис­лення зміни швидкостіракети за умови невеликої зміни маси *М* ракети в резуль­таті роботи її двигунів. Зміна імпульсу ракети за інтервал часу дорівнює імпульсу сили тяги , яка вини­кає в результаті роботи реактивних дви­гунів:

З виразів (13.2)і (13.4) випливає рівність: З (13.5) випливає:



де— секундна витрата палива.

Вираз (13.6) дає можливість обчислити си­лу тяги реактивного двигуна за відомими значеннями швидкості витікання реактив­ного струменя й маси речовини, яку вики­дає ракета за 1 секунду. Для того, щоб ракета рухалася, не обов'яз­кова її взаємодія з навколишнім середови­щем. Тому ракети використовують для за­пуску штучних супутників Землі й косміч­них станцій.

Можливість використання реактивних дви­гунів для здійснення польотів у космічний простір уперше науково обґрунтував росій­ський учений і винахідник *Костянтин Едуардович Ціолковський* 1903 року.

## [§14. Закон всесвітнього тяжіння](" \l "Зміст)

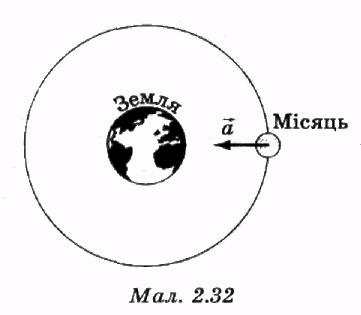
### Сила тяжіння

Факт, що тіла будь-якої маси падають на Землю з однаковим прискоренням вільного падіння *g,* означає, що на всі тіла біля по­верхні Землі діє сила, прямо пропорційна до маси тіла. Цю силу називають *силою тяжіння.* За другим законом Ньютона сила тяжіння

*F* дорівнює добуткові маси *т* тіла на при­скорення вільного падіння *g:*



Спостереження свідчать, що сила тяжіння діє не тільки біля самої поверхні Землі» але й на віддалях 1 м, 100 м, 1 км, 30 км. Чи діє сила тяжіння на ще більших віддалях? Чи змінюється її значення відповідно до віддалення від поверхні Землі? На ці пи­тання вперше дав відповідь англійський учений *Ісаак Ньютон* 1682 року. Обчисливши доцентрове прискорення руху Місяця навколо Землі (мал 2.32), Ньютон виявив, що це прискорення приблизно в 3600 разів менше за прискорення вільного падіння біля поверхні Землі. Відстань до Місяця в 60 разів більша за відстань від центра Землі до її поверхні. Тому доцентро­ве прискорення Місяця можна пояснити дією сили тяжіння з боку Землі, якщо си­ла тяжіння зменшується обернено про­порційно до квадрата віддалі.



### Сила всесвітнього тяжіння

На основі цих розрахунків Ньютон зробив висновок, що сила тяжіння на Землі є вия­вом універсальної сили, що діє у Всесвіті між будь-якими тілами. Цю силу він наз­вав *силою всесвітнього тяжіння.* Якщо розміри двох тіл малі порівняно з віддалля-ми між ними, то *сила всесвітнього тяжіння F прямопропорційна до добутку масі обернено пропорційна до квадрата віддалі r між тілами:*



### Закон всесвітнього тяжіння

Рівняння (14.1), що виражає залежність сили всесвітнього тяжіння від мас тіл і віддалі між тілами, називають *законом всесвітнього тяжіння.*

### Гравітаційна стала

Коефіцієнт *G* у формулі (14.1) закону все­світнього тяжіння називають *гравітацій­ною сталою.*

Гравітаційна стала може бути експеримен­тально визначена в досліді вимірювання сили гравітаційного притягання між двома тілами з відомими масами. Такі досліди

вперше провів 1788 року англійський фі­зик *Генрі Кавендіш.* Значення гравітацій­ної сталої за результатами сучасних експе­риментів:

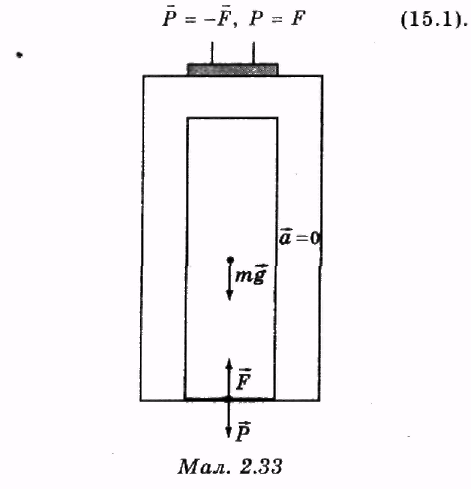


## [§15. Вага і невагомість](" \l "Зміст)

**Вага тіла**

У житті часто використовують поняття ва­га тіла. *Вагою тіла називають силу, з якою воно, унаслідок притягання до Землі, діє на горизонтальну опору або вертикаль­ний підвіс.*

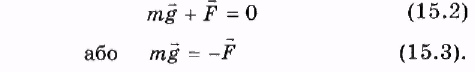
За третім законом Ньютона з боку опори на тіло діє сила реакції опорищо дорівнює за модулем силі вагий протилежно на­прямлена (мал. 2.33)



Окрім реакції опори на тіло, діє сила тяжіння Якщо під дією цих двох сил

тіло залишається нерухомим або рухається з постійною швидкістю, то сума цих сил

дорівнює нулю:



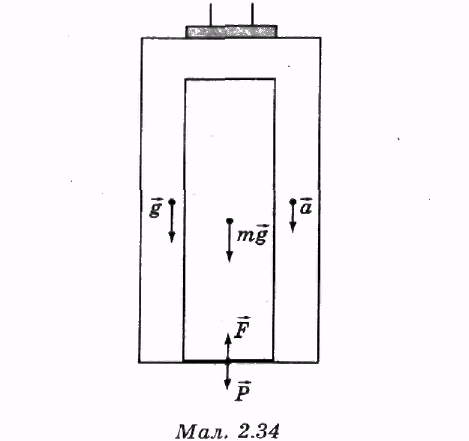
З виразів (15.1) і (15.3) випливає, що *вага * *нерухомого тіла або тіла, що рівномір­но рухається, дорівнює силі тяжіння mg, яка діє на тіло з боку Землі:*



Проте сила тяжінняприкладена до ті­ла, а сила ваги— до опори.

Коли рух тіла й опори прискорений, вага тіла може бути більшою або меншою за си­лу тяжіння що діє на тіло. Наприклад, ліфт рухається з прискорен­ням, і вектор прискореннянапрямлений вертикально вниз. З таким самим приско­ренням рухається тіло, яке перебуває в кабіні ліфта. За другим законом Ньютона геометрична сума векторів сили тяжіння  і сили пружностіщо діє на тіло з бо­ку підлоги, дорівнює добуткові маси *т* тіла на прискоренняйого руху (мал. 2.34):





Вектори сил тяжінняй пружності

протилежно напрямлені» вектор прискорен­нязбігається за напрямом з вектором си­ли тяжіння. Тому



З рівнянь (15.6) і (15.1) випливає:



Коли вектор прискоренняруху ліфта на­прямлений униз, вага тіла в ліфті менша за силу тяжіння на величину *та.* Якщо прискорення ліфтадорівнює при­скоренню вільного падіння вага тіла в ліфті дорівнює нулю:

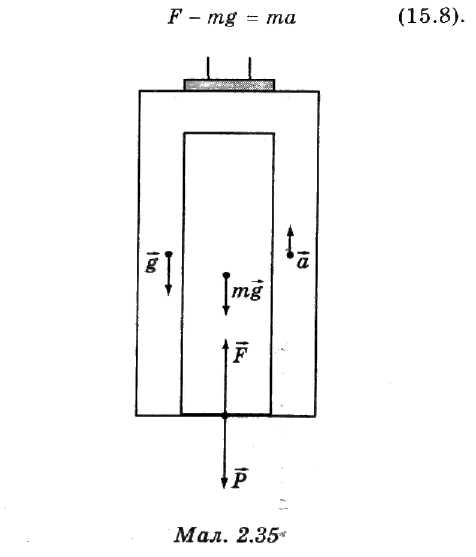


### Невагомість

*Явище відсутності ваги під час руху тіла й опори з прискоренням вільного падіння називають невагомістю.* Коли космічний корабель рухається за інерцією за межами земної атмосфери, на нього діє тільки сила всесвітнього тяжіння. Космічний корабель і космонавт рухаються з однаковим прискоренням вільного падін­ня, тому вага космонавта дорівнює нулю. Стан невагомості можна спостерігати не ли­ше на космічних кораблях. Під час підго­товки космонавтів створюють стан неваго­мості в літаку. Для цього літак з великої висоти деякий час рухається вниз з приско­ренням вільного падіння.

### Перевантаження

У ліфті, що рухається з прискоренням напрямленим вертикально вгору, напрям вектора прискореннязбігається з напря­мом сили пружності (мал. 2.35). У цьому випадку з рівняння (15.5) випливає:

З рівнянь (15.8) і (15.1) вага тіла *Р* у цьо­му випадку дорівнює:



тобто вага тіла більша за діючу на нього си­лу тяжіння.

Якщо під час прискореного руху тіла й опо­ри вага тіла більша за діючу на нього силу тяжіння, то відношення ваги *Р* до сили тяжіння *mg* називають *перевантаженням.* Перевантаження відчувають на собі космо­навти, льотчики, водії спортивних авто­мобілів.

## [§16. Рух під дією сили тяжіння](" \l "Зміст)

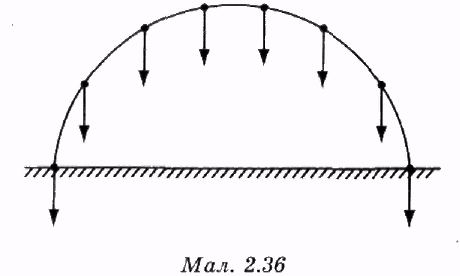
На будь-яке тіло на Землі або в космічному просторі поблизу неї завжди діє сила все­світнього тяжіння з боку Землі. Ця сила діє як на тіла, що перебувають у спокої, так і на рухомі тіла.

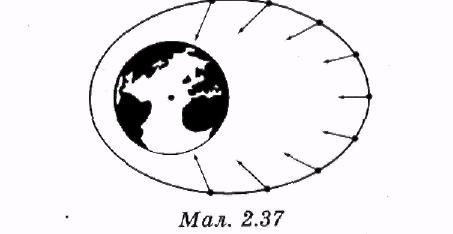
Розв'язуючи задачі для визначення коор­динат , траєкторій, швидкостей і приско­рень тіл, що рухаються під дією сили тя­жіння, звичайно можна вибрати одну з двох спрощених моделей їхньої взаємодії із Землею.

### Однорідне гравітаційне поле

Перша модель — модель однорідного граві­таційного поля. Цю модель застосовують, коли переміщення надто малі порівняно з радіусом Землі.

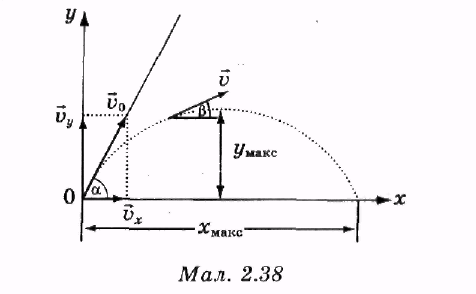
У цьому випадку вектор сили тяжіння у всіх точках траєкторії руху тіла можна вважати постійним за модулем і напрямом (мал. 2.36).



Якщо переміщення тіл можна порівняти з радіусом Землі, то необхідно враховувати зміни вектора сили тяжінняза модулем і напрямом у міру зміни положення тіла відносно Землі. У таких випадках часто бу­ває зручно використовувати другу модель, у якій Землю розглядають як матеріальну точку з масою, що дорівнює масі Землі і яка міститься в центрі Землі. Вектор сили тяжіння в будь-якій точці траєкторії руху тіла напрямлений до центра Землі, модуль вектора сили тяжіння змінюється із зміною віддалі від центра Землі відповідно до зако­ну всесвітнього тяжіння (мал. 2.37). 

Розглянемо рух тіла в однорідному граві­таційному полі. Нехай тіло кинули з по­верхні Землі під кутом а до горизонту з по­чатковою швидкістю Визначимо коор­динати й швидкість тіла в довільний мо­мент часу *t,* максимальну висоту підняття тіла, час його польоту, дальність польоту. Опір повітря враховувати не будемо. Якщо швидкістьтіла значно менша за першу космічну швидкість, то дію сили тяжіння можна розглядати як дію однорідного гравітаційного поля.

Виберемо як тіло відліку Землю, початок координат розмістимо в точці початкового положення тіла в момент часу *t =* 0, коор­динатну вісь *Оу* направимо вертикально вгору, координатну площину *уОх* сумісти­мо з вектором початкової швидкості тіла (мал. 2.38).

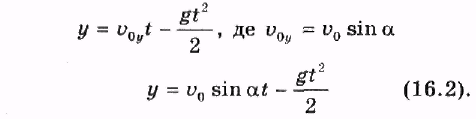


Оскільки вектор сили тяжіння напрямле­ний вертикально вниз, у вибраній системі координат рух тіла відбуватиметься в площині *уОх* і його положення в просторі буде однозначно визначатися двома координата­ми *х* і *у.* У початковий момент часу *t* = 0 тіло перебуває на початку координат, отже, початкові координати тіладорівнюють нулю:  Оскільки вздовж осі 0х на тіло не діють зовнішні сили, ко­ордината *х* тіла буде змінюватися з часом за законом





Уздовж осі *Оу* на тіло діє сила тяжіння. Під дією сили тяжіння тіло рухатиметься з постійним прискореннямОскільки век­тор прискоренняпротилежно напрямле­ний до вертикальної складової вектора по­чаткової швидкості ,то координата *у* тіла буде змінюватисяз часом за законом



Рівняння (16.1) і (16.2) визначають коорди­нати тіла в будь-який момент часу *t.* Оскільки вздовж осі Ох на тіло не діють зовнішні сили, проекція вектора швидкості на вісь Ох з часом не змінюється й дорів­нює:

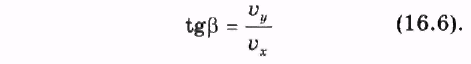
Оскільки вектор прискорення вільного па­діння тіланапрямлений протилежно до вертикальної складової вектора початкової швидкостіпроекція швидкості тіла на

вісь *Оу* в будь-який момент часу дорівнює: 

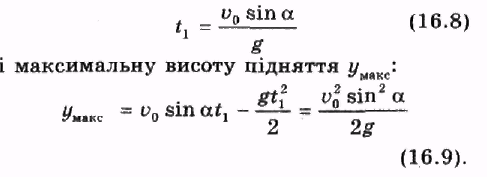
Модуль вектора швидкості  тіла в будь-який момент часу дорівнює:



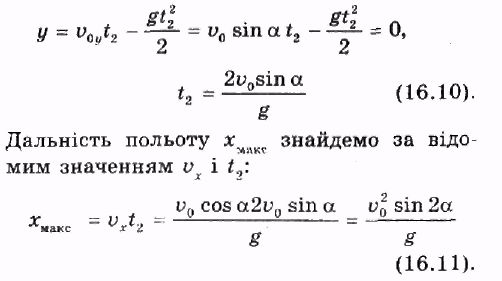
Напрям вектора швидкостів момент ча­су *t* можна визначити за значенням кута бета між векторомі віссю *Ох:*



Тіло досягає максимальної висоти підняття в той момент часу, коли проекція швид­кості на вісь *Оу* дорівнює нулю, тобто підняття тіла припиняється й починається його падіння. З умови  знайдемо час  піднімання тіла до верхньої точки траєкторії:



Час руху тіла до досягнення горизонталь­ної поверхнівизначимо з умови *у = 0:*



## [§17. Космічні швидкості. Рух планет і супутників](" \l "Зміст)

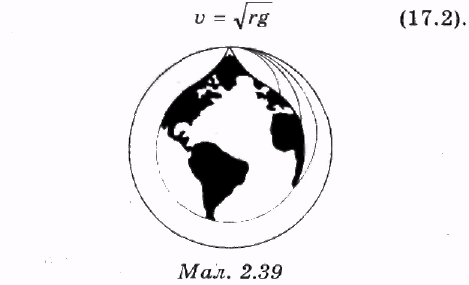
Розглянемо рух тіла, яке кинули на віддалі А від поверхні Землі, з початковою швид­кістюв горизонтальному напрямі, якщо відсутня взаємодія з атмосферою Землі. З моменту початку руху тіло буде рухатися з прискореннямвільного падіння, швид­кістьтіла змінюватиметься за напрямом і модулем. Коли значення початкової швидкостіневелике, траєкторія руху тіла перетинається з поверхнею Землі. Що біль­ша початкова швидкість руху тіла, то далі від початкової точки воно досягає поверхні Землі. Визначимо, при якому значенні по­чаткової швидкості тіло, яке кинули гори­зонтально, буде віддалятися на таку відстань від Землі, рухаючись за інерцією, на яку буде наближатися в результаті вільного падіння (мал. 2.39).

### Перша космічна швидкість

Для здійснення рівномірного руху по колу радіуса r, його горизонтально напрямлена швидкість повинна мати таке значення v*,* при якому доцентрове прискорення дорів­нює прискоренню вільного падіння:



З (17.1) випливає:



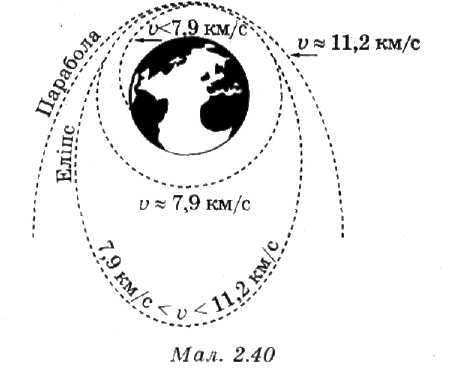
Швидкість *v,* за якої тіло може рухатися по коловій орбіті навколо Землі, називають *першою космічною швидкістю.* З формули (17.2) для значення r, що дорівнює радіусу Землі,перша

космічна швидкістьдорівнює:

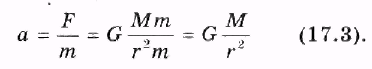
Коли початкова швидкість менша за 7,9 км/с, то тіло, яке кинули горизонтально, про­летівши деяку відстань, упаде на поверхню Землі. За відсутності повітря й при швид­кості 7,9 км/с, тіло рухатиметься навколо Землі по колу, ставши її штучним супутни­ком.

### Друга космічна швидкість

Коли перша космічна швидкість трохи пе­ревищена, орбіта супутника буде еліптич­ною, а коли швидкість досягне 11,2 км/с — перетвориться на параболу, гілки якої йдуть у нескінченність (мал. 2.40).



Швидкість, за якої тіло може подолати дію сили притягання небесного тіла й віддали­тися від нього на нескінченно далеку відстань, називають *другою космічною швидкістю.*

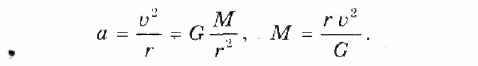
З формули (17.2) випливає, що для обчис­лення першої космічної швидкості на відстані r від будь-якого небесного тіла, зірки або планети, треба знати прискорен­ня *а* вільного падіння на цій відстані від центра мас небесного тіла. Небесне тіло ма­сою *М* діє на інше тіло масою *m* на відстані rсилою всесвітнього тяжіння *F.* Отже, прискорення вільного падіння тіла на цій відстані дорівнює: 

З (17.2) і (17.3) перша космічна швидкість на відстані rвід центра небесного тіла ма­сою *М* дорівнює:



Формула. (17.4) дозволяє обчислити маси небесних тіл, навколо яких обертаються інші небесні тіла під дією сил всесвітнього тяжіння.

Масу *М* Сонця можна знайти за відомими значеннями швидкості v руху Землі по її орбіті й радіусу rземної орбіти:



Швидкість *v* руху Землі по орбіті можна знайти, знаючи радіус r земної орбіти й період *Т* її обертання навколо Сонця: 

Для обчислення маси Сонця одержимо фор­мулу:



Виразимо період обертання Землі навколо Сонця в одиницях СІ:



Підставивши числові значення величин, знайдемо масу Сонця:

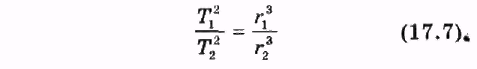


З формули (17.5) випливає, що для всіх су­путників, які обертаються коловими орбітами навколо однієї планети, або для всіх планет, що обертаються навколо однієї зір­ки, відношення квадратів періодів обертан­ня до кубів радіусів орбіт є величиною од­наковою:

Рівність (17.6) діє і в разі руху супутників або планет еліптичними орбітами, якщо ви­користовувати як r великі півосі еліпсів.

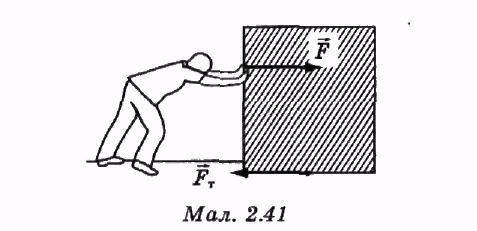
### Третій закон Кеплера

Факт, що квадрати періодів обертання пла­нет навколо Сонця відносяться як куби ве­ликих півосей їхніх еліптичних орбіт, відкрив *Йоганн Кеплер.* Цей факт нази­вають *третім законом Кеплера:*



## [§18. Сила тертя](" \l "Зміст)

Спробуємо зсунути з місця шафу, приклав­ши до неї силу  що діє в горизонтально­му напрямі (мал. 2.41). Дослід показує, як­що сила  невелика (наприклад, дію здійснюють одним пальцем), то шафа зали­шається нерухомою. Отже, коли діє гори­зонтальна силато виникає якась рівна за модулем і протилежнонапрямлена сила:



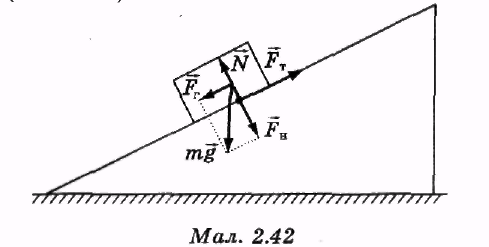
### Сила тертя спокою

Силу, яка виникає на межі стикання тіл під час спроби переміщення одного тіла по по­верхні іншого тіла за відсутності відносного руху тіл, називають *силою тертя спокою.* Якщо діюча на тіло силадосить велика, тіло починає рухатися по поверхні іншого тіла. Для рівномірного руху тіла по будь-якій поверхні необхідна дія певної по­стійно діючої зовнішньої силинапрямленої вздовж поверхні.

### Сила тертя ковзання

Цей факт пояснюють тим, що коли одне тіло рухається по поверхні іншого тіла, то виникає сила, протилежно напрямлена до вектора швидкостіруху першого тіла відносно поверхні іншого тіла. Цю силу називають *силою тертя ковзання.* Сили тертя зумовлені взаємодією електрич­них зарядів, що входять до складу атомів речовини.

Досліди показують, що сила тертя ковзан­ня  не залежить від площі поверхні стикання тіл, але прямо пропорційна до си­ли тиску, напрямленої перпендикуляр­но до поверхні стикання тіл. За третім законом Ньютона на рухоме тіло діє з боку опори рівна за модулем і проти­лежна за напрямом сила реакції опори (мал. 2.42).



Оскількито сила тертяпрямо пропорційна до сили реакції опори *N:*



### Коефіцієнт тертя

Відношення сили тертядо сили реакції опори називають *коефіцієнтом тертя.* Коефіцієнт тертязалежить від матеріалів стичних поверхонь і якості їхньої обробки.

## [§19. Рівновага тіл](" \l "Зміст)

Ознакою взаємодії тіл у динаміці є виник­нення прискорень. Проте за певних умов тіло може перебувати в спокої або рухати­ся рівномірно й прямолінійно, коли на ньо­го одночасно діє декілька сил.

### Механічна рівновага

Стан, у якому перебуває тіло під дією сил за умови спокою всіх його точок у даній системі відліку, називають *станом механічної рівноваги.*

### Статика

Про сили, які діють на тіло в стані механічної рівноваги, кажуть, що вони зрівноважують або компенсують дії одна одної. Умови механічної рівноваги тіл вив­чає розділ механіки — *статика.*

### Умови рівноваги матеріальної точки

Відповідно до другого закону Ньютона ма­теріальна точка необмежений час перебуває в стані рівноваги, якщо в інерціальній сис­темі відліку її початкова швидкість дорівнює нулю й сума векторів усіх при­кладених до неї сил дорівнює нулю:



Для визначення умов спокою тіла скінчен­них розмірів треба з'ясувати результати дії декількох сил, прикладених до одного тіла в різних його точках.

Дослід показує, що результат дії силина тіло однаковий, коли сила прикладена до будь-якої точки на прямій, яка збігається з напрямом вектора Тому, розглядаючи дії на тіло декількох сил, напрямлених уздовж однієї прямої, усі ці сили можна розглядати прикладени­ми до будь-якої однієї точки на прямій, яка збігається з напрямом векторів.

### Центр ваги

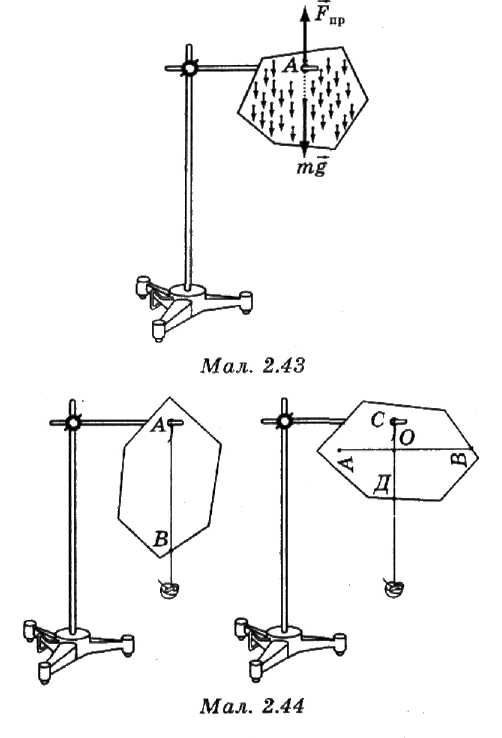
Результати дії на тіло декількох сил, що не лежать на одній прямій, легко зрозуміти, якщо скористатися поняттями *центру ваги і центру мас* тіла.

Центром ваги тіла називають точку при­кладення рівнодійної сил гравітаційного притягання, що діють на всі складові час­тини тіла (мал. 2.43). Розміщення центру ваги можна визначити, підвішуючи тіло у двох різних точках.

У кожному досліді рівнодійна всіх сил тяжіння зрівноважується протилежно на­прямленою силою пружності, напрямленою вертикально вгору вздовж нитки підвісу. Отже, точка прикладення рівнодійної сил тяжіння міститься в точці перетину двох прямих (мал. 2.44). Цю точку називають *центром ваги тіла.*

### Центр мас

Точка, у якій міститься центр ваги, є особливою й під час дії на тіло сил будь-якої іншої природи. У цих випадках ЇЇ назива­ють *центром мас.*



### Умови рівноваги центру мас

Дослід показує, що коли на тіло діють будь-які сили, прикладені до різних точок тіла, але які задовольняють умову (19.1), то прискорення центру мас тіла дорівнює нулю. Отже, умова (19.1) є *умовою рівнова­ги центру мас тіла.*

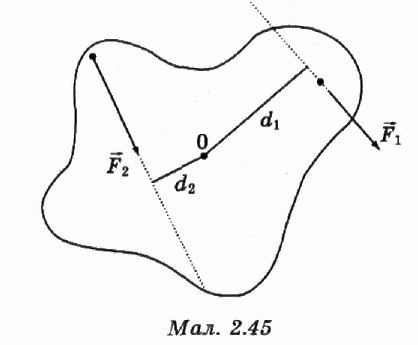
Коли центр мас нерухомий, тіло може бути нерухомим або обертатися навколо нерухо­мого центру мас.

### Умови рівноваги тіла відносно осі обертання

Дослід показує, якщо тіло може вільно обертатися навколо певної осі й перебуває спочатку в стані *спокою*, то коли на нього діє декілька сил, воно залишається в спо­кої відносно цієї осі, якщо сума моментів сил відносно цієї осі дорівнює нулю: 

### Момент сили

*Моментом сили* відносно осі називають до­буток модуля сили *F* на відстань *d* від пря­мої, на якій лежить вектордо осі обер­тання (мал. 2.45).



### Плече сили

Відстань *d* називають *плечем сили.* Моменти сил, що створюють обертання тіла навколо вибраної осі в одному довільному напрямі відносно осі, уважають позитивни­ми; ті, які створюють обертання в проти­лежному напрямі — негативними.

### Загальні умови рівноваги тіла

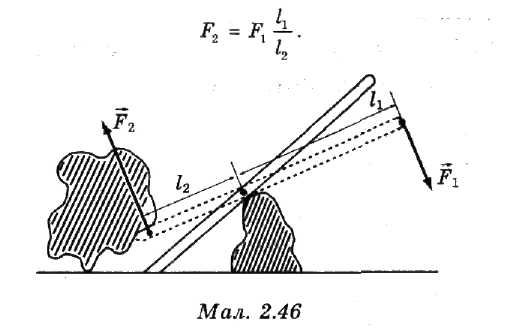
З умов спокою центру мас тіла (19.1) і спо­кою тіла відносно певної осі (19.2) можна сформулювати загальну умову рівноваги тіла: *початково нерухоме тіло, на яке діє декілька зовнішніх сил. залишається в спо­кої, якщо геометрична сума всіх прикладе­них сил дорівнює нулю* (19.1) *і сума мо­ментів усіх прикладених сил відносно будь-якої осі дорівнює нулю* (19.2).

**Важіль**

Тіло, яке має вісь обертання, можна вико­ристовувати для одержання виграшу в силі в механічних пристроях і машинах. Таке тіло називають *важелем.* Для важеля, у якого точки прикладання силперебувають на відстанях

від осі обертання тає плечами сил, діє умова рівноваги (мал. 2.46);

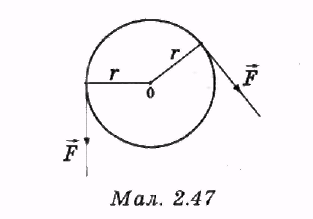




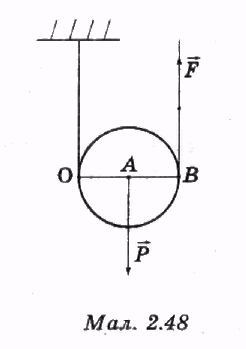
Такий важіль може гарантувати виграш у силі вразів, якщо

### Блок

Колесо, закріплене на осі, можна викорис­товувати для зміни напряму дії сили й ви­грашу в силі, якщо через нього пропустити гнучкий трос або мотузку. Якщо вісь коле­са нерухома, таке колесо називають *нерухо­мим блоком;* якщо вісь колеса перемі­щується — *рухомим блоком.* Нерухомий блок дозволяє змінити напрям дії сили (мал. 2.47). Плечі сил, прикладені до різ­них точок нерухомого блока, однакові. То­му нерухомий блок не дає виграшу в силі.



Піднімаючи вантаж вагою *Р* за допомогою рухомого блока, отримуємо виграш у силі у два рази, оскільки плече *ОА* сили вагиу два рази менше за плече *ОВ* силинатя­гування троса (мал. 2.48).



## [§20. Взаємодія твердих, рідких і газоподібних тіл](" \l "Зміст)

У навколишньому світі ми звичайно маємо справу з тілами у твердому, рідкому або га­зоподібному стані. Взаємодія тіл у кожно­му з трьох станів має свої особливості. Тіла у твердому стані, взаємодіючи з іншими тілами, звичайно мало змінюють свою фор­му та об'єм.

Якщо тверде тіло перебуває в контакті з іншим тілом й обидва вони нерухомі, то дія зовнішньої сили на одне тверде тіло пере­дається іншому твердому тілу за напрямом дії зовнішньої сили й викликає його дефор­мацію. Коли сила однакова, деформація за­лежить від площі зіткнення. Маючи одна­кову вагу, людина у взутті без каблуків за­лишає слабкі сліди на землі, а у взутті на тонких каблуках залишає в землі глибокі сліди.

Дія різних силоднакова, якщо однакові відношення діючих сил  до площі їхніх зіткнень   з іншим тілом.

### Тиск

Відношення сили *Ft* що діє перпендикуляр­но до поверхні, до площі 5, на яку діють, називають *тиском.*

### Паскаль

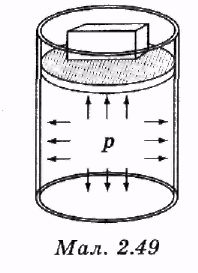
*У Міжнародній системі одиниць (СІ) оди­ницю тиску називають паскаль (Па):*



Тиск 1 паскаль створюється силою в 1 нью­тон, спрямованою перпендикулярно до по­верхні, коли її дія по поверхні площею 1 квадратний метр розподілена рівномірно. За умов дії зовнішніх сил рідкі тіла легко змінюють свою форму, хоча їхній об'єм змінюється мало. Гази легко змінюють і форму, і об'єм.

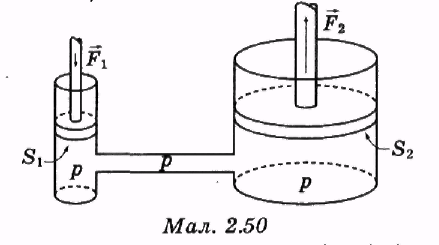
### Закон Паскаля

На відміну від твердих тіл *рідини й гази пе­редають діючий на них тиск однаково в усіх напрямах* (мал. 2.49). Це твердження на основі дослідів висловив французький учений *Блез Паскаль,* тому цей закон називають *законом Паскаля.* Здатність рідин передавати діючий на них тиск за всіма напрямами використовують на практиці в механізмах для одержання виграшу в силі.



### Гідравлічний прес

У гідравлічному пресі чи домкраті два різних циліндри з поршнями заповнюють рідиною і з'єднують між собою трубкою (мал. 2.50).



Коли на поршень у малому циліндрі діє си­ла , на рідину діє тиск 

де— площа поршня в першому цилін­дрі.

Рідина передає такий самий тиск *р* на пор­шень площеюу другому циліндрі. Сила тискуна другий циліндр дорівнює:

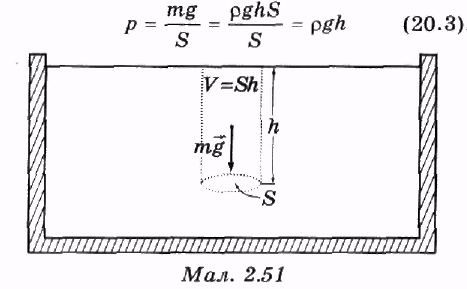


Вираз (20.2) показує, що сила тиску створювана другим поршнем, у стільки разів більша за силу тиску що діє на перший поршень, у скільки разів площа другого поршня більша за площупершо­го поршня.

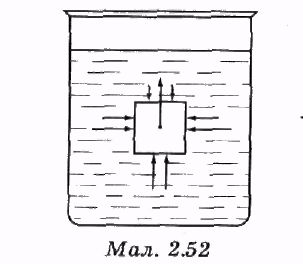
У стані спокою всередині рідини, яка за­знає дії сили тяжіння, на відстані *h* від її поверхні дія сили тяжіння  на верхні шари зрівноважується силою реакції з боку нижніх шарів.



Тиск на глибині *h* в рідині густиною р дорівнює (мал. 2.51):



З (20.3) випливає, що тиск *р* у рідині зрос­тає прямо пропорційно до глибини *h* зану­рення.

Коли відбувається занурення твердого тіла в рідину або газ, сили тиску на бічні сторо­ни тіла зрівноважують одна одну. Проте тиск на нижній бік тіла вищий за тиск на верхній бік, тому рівнодійна всіх сил, що діють на тверде тіло в рідині або газі, не дорівнює нулю й напрямлена вертикально вгору (мал. 2.52). 

### Закон Архімеда

*На занурене в рідину або газ тіло діє виштовхувальна сила, яка дорівнює вазі витісненої рідини або газу.* Цей закон відкрив давньогрецький учений *Архімед.*

На тіло об'ємом *V у* рідині (або газі) густи­ною діє виштовхувальна сила



і сила тяжіння, напрямлена вниз,



де— густина тіла.

Якщо густинатіла більша за густину рідини (абогазу, то рівнодійна сил напрямлена вниз, тіло тоне.

Якщо густинатіла менша за густину рідини (абогазу) то рівнодійна сил напрямлена вгору, тіло спливає.

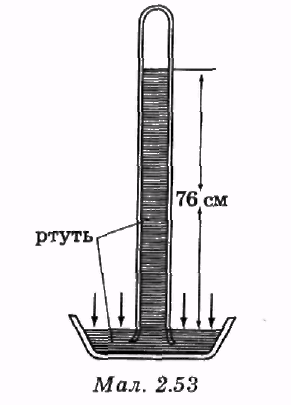
Плаваюче тіло занурене в рідину на стільки, що вага витісненої ним рідини дорівнює вазі тіла.

Гази, як і тверді та рідкі тіла, мають масу й вагу.

Біля поверхні Землі тиск атмосферного повітря дорівнює відношенню ваги стовпа повітря, що розміщений над ділянкою по­верхні Землі й сягає до межі земної атмо­сфери, до площі *S* ділянки поверхні Землі:



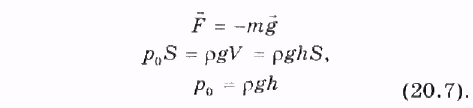
Тиск атмосферного повітря експеримен­тально виявив у XVII столітті італійський учений *Еванджеліста Торрічеллі.* Він за­повнив рідкою ртуттю закриту з одного кінця скляну трубку завдовжки біля мет­ра, а відкритий кінець трубки опустив у посудину з ртуттю. Потім поставив трубку вертикально і виявив, що ртуть повністю не витекла, але опустилася від закритого кінця до висоти 76 см від відкритої по­верхні ртуті в посудині (мал. 2.53).



### Атмосферний тиск

З цього досліду Торрічеллі зробив висновок, що біля поверхні Землі існує *атмосферний тиск.*

Усередині трубки з ртуттю немає повітря, тому тиск на ртутний стовпчик зверху дорівнює нулю. На відкриту поверхню ртуті в посудині повітря чинить тискі цей тиск за законом Паскаля передається в усіх напрямах. Отже, у трубці на рівні по­верхні ртуті в посудині тиск дорівнює атмо­сферному тискові, сила тиску напрямлена вгору. Верхній рівень ртуті у трубці міс­титься на такій висоті А, за якої сила тис­кунапрямлена вгору, зрівноважується силою тяжіння ртутного стовпчика:



З (20.7) можна знайти значення атмосфер­ного тискуза висотою ртутного стовпчи­ка h =76 см, густиною ртуті і прискоренням вільного падіння 



### Ртутний барометр

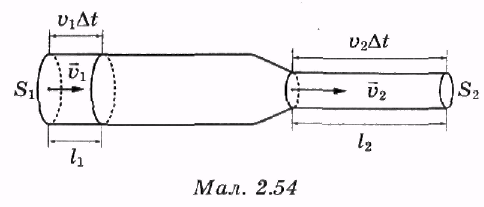
Коли змінюється атмосферний тиск, то ви­сота верхнього рівня в трубці також змінюється. Це дозволяє використати її для вимірювання змін атмосферного тиску. Такий прилад називають *ртутним баро­метром.*

### Рух рідин і газів

Рідини не мають постійної форми, а гази не мають ні постійної форми, ні постійного об'єму. Це викликає певні труднощі під час вивчення законів їхнього руху. Проте зако­ни взаємодії твердих тіл з рідинами й газа­ми необхідно знати для проектування мор­ських кораблів, автомобілів, літаків, кос­мічних кораблів, космічних ракет, нафто­проводів і газопроводів.

Розглянемо спочатку особливості руху рідин. Для спрощення задачі вважатимемо, що рідина нестислива. У цьому випадку че­рез поперечний переріз труби в будь-якому місці повинна протікати однакова кіль­кість рідини за одиницю часу. Якщо площа поперечного перерізу труби на одній ділян­ці, а на іншій то з рівності об'ємів рідини, яка протікає  випливає, що  (мал. 2.54).

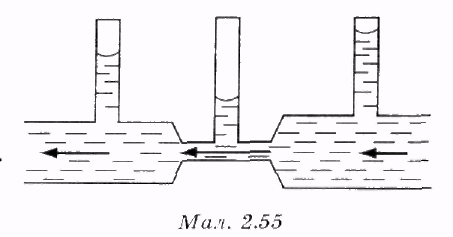
Оскількиде  —- швидкості течії рідини на першій і другій ділянках труби.



Отже, швидкість течії нестисливої рідини в трубі обернено пропорційна до площі попе­речного перерізу труби.

### Закон Бернуллі

Оскільки рідина у вузькій частині труби рухається з більшою швидкістю, ніж у ши­рокій, то під час переходу з широкої части­ни труби у вузьку вона рухається прискоре­но. Прискорений рух рідини під час пере­ходу з широкої ділянки труби у вузьку по­казує, що тиск рідини в широкій ділянці труби більший за тиск рідини у вузькій ділянці труби. Отже, тиск рідини більший там, де швидкість течії менша, і менший там, де швидкість течії більша (мал. 2.55).



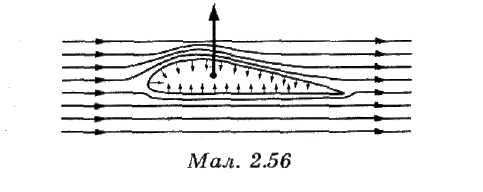
Цей закон відкрив *Даниїл Бернуллі* у XVIII столітті, тому його називають *законом Бер­нуллі.*

Закон Бернуллі застосовують не тільки для рідин, але й для газів.

### Підіймальна сила крила літака

Зниження тиску газу із збільшенням швид­кості його руху є однією з причин виник­нення підіймальної сили крила літака. Як­що поверхня крила літака зверху опукла, а знизу плоска (мал. 2.56), то за умови гори­зонтального розміщення нижньої площини крила під час його обтікання, повітряний потік за один і той самий час проходить над крилом більший шлях, ніж під крилом.

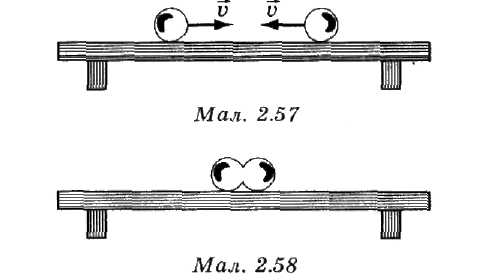
Отже, швидкість повітряного потоку над крилом більша, ніж під крилом. Оскільки швидкість руху повітря під крилом менша за швидкість його руху над крилом, тиск повітря знизу крила більший за тиск по­вітря зверху. Так виникає *підіймальна си­ла крила літака.*



## [§21. Кінетична енергія](" \l "Зміст)

### Енергія

Відкриття закону збереження імпульсу по­казало, що механічний рух тіл має кіль­кісну міру, яка зберігається при будь-яких взаємодіях тіл. Цією мірою є імпульс. Про­те за допомогою тільки цієї міри руху неможливо дати повне пояснення всіх зако­номірностей взаємодії тіл. Розглянемо такий приклад. Дві однакові пластилінові кулі рухаються назустріч од­на одній з однаковими швидкостями (мал. 2.57). Зіткнувшись, вони зупиняються й з'єднуються в одне тіло (мал. 2.58).



Сума імпульсів куль до зіткнення й після зіткнення однакова й дорівнює нулю, закон збереження імпульсу діє. Якби кулі після зіткнення змогли б просто зупинитися без будь-яких інших змін у них, то це означа­ло б, що механічний рух під час взаємодії тіл може зникати безслідно. Але природа влаштована інакше. У ній ніколи й ніде ме­ханічний рух не виникає сам по собі, ніко­ли й ні за яких взаємодій механічний рух тіл не зникає безслідно.

Що ж відбувається з пластиліновими куля­ми під час зіткнення, окрім зміни швид­кості руху? Кулі деформуються й нагріва­ються.

Підвищення температури тіл під час зіткнення можна спостерігати, наприклад, ударивши молотом по свинцевому або мідному стрижню. Зміна температури тіла свідчить про зміну швидкостей хаотичного теплового руху атомів, з яких складається тіло. Отже, механічний рух не зникає безслідно, він перетворюється в іншу фор­му руху матерії.

Чи є в природі міра руху матерії, яка зберігається за будь-яких перетворень однієї форми руху на іншу? Досліди й спо­стереження показали, що така міра руху в природі існує. Її назвали *енергією.*

*Енергією називають фізичну величину, яка є кількісною мірою різних форм руху ма­терії.*

Для точного визначення енергії як фізич­ної величини необхідно знайти її зв'язок з іншими величинами, вибрати одиницю вимірювання й знайти способи її вимірю­вання.

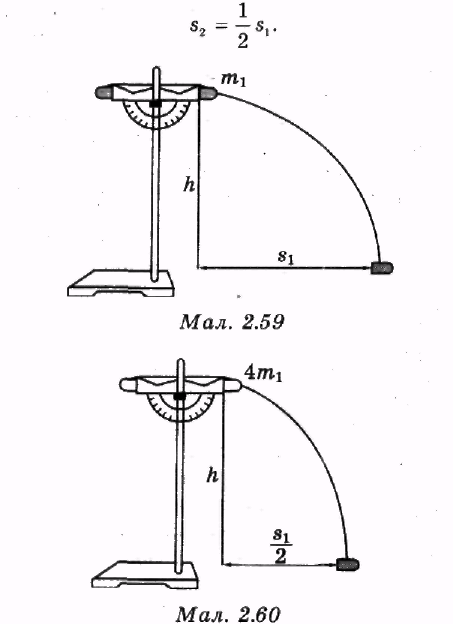
*Механічною енергією називають фізичну величину, яка є кількісною мірою механічного руху тіл під час його перетво­рення на інші форми руху.*

### Кінетична енергія

Як міру поступального руху тіл треба знай­ти фізичну величину, однакову в різних по­ступально рухомих тілах за умов однакової зміни якої-небудь іншої форми руху, яка перетворюється на механічний поступаль­ний рух. Для передачі різним тілам одна­кової енергії можна застосувати такий спосіб.

Використаємо як джерело енергії пружину балістичного пістолета. Однаково стиснена сталева пружина може надавати поступаль­ного руху різним снарядам, передаючи їм однакову енергію.

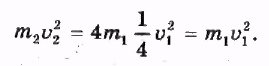
Закріпимо балістичний пістолет у штативі горизонтально, зробимо постріл снарядом масиі виміряємо дальність його польо­ту(мал. 2.59).



Замінимо снаряд масоюна інший, маса якогов 4 рази більша,, і повторимо дослід. За умов однакового початкового стискання пружини, дальність польо­ту другого снарядуу два рази менша, ніж у першому досліді (мал. 2.60):

Обидва снаряди падають з однакової висо­ти, тому час їхнього руху однаковий. Оскільки дальність польотудругого сна­ряда у два рази менша від дальностіпо­льоту першого снаряда, початкова швид­кість другого снаряда у два рази менша за початкову швидкість першого снаряда: 

Отже, виходить, що у двох снарядів з різними масами в цьому досліді однаковий добуток маси на квадрат швидкості:



Досліди з іншими тілами показують, що однаково стиснена пружина надає тілам з різними масами  такі швидкості  що добуток маси тіла на квадрат швидкості для всіх тіл однаковий:



Отже, величинаможе бути кількісною мірою поступального руху тіл під час пере­творень інших форм руху на поступальний механічний рух або поступального меха­нічного руху на інші форми руху. У фізиці *як кількісну міру поступального механічного руху під кас виникнення його з інших форм руху або перетворення на інші форми руху беруть величину, що дорівнює половині добутку маси тіла на квадрат швидкості його руху.* Цю фізичну величи­ну називають *кінетичною енергією тіла* й позначають літерою *Е* з індексом к:



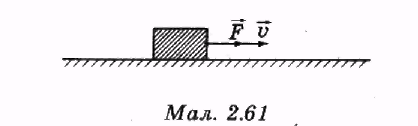
Оскільки швидкість є величиною, що зале­жить від вибору системи відліку, значення кінетичної енергії тіла залежить від вибору

системи відліку.

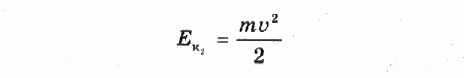
## [§22. Робота](" \l "Зміст)

Будь-яка зміна швидкості поступального руху тіла, а, отже, і його кінетичної енергії  , відбувається в результаті взаємодії з іншими тілами. Використовуючи другий закон Ньютона, установимо зв'язок зміни кінетичної енергії тіла із силами, що діють на тіло.

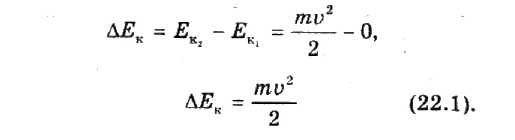
Обчислимо зміну кінетичної енергії тіла масою *т* за час коли на нього діє постійна сила *F.* Якщо в початковий мо­мент часу швидкість тіла дорівнює нулю, то напрям векторашвидкості тіла в будь-який момент часу збігається з вектором си­ли(мал. 2.61).



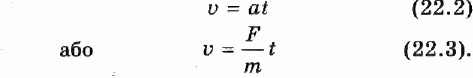
Початкове значення кінетичної енергії дорівнює нулю,У момент часу, коли швидкість досягає значення у, кінетич­на енергія тіладорівнює:



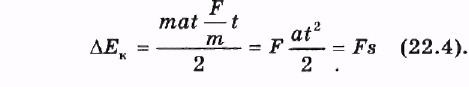
Зміна кінетичної енергії дорівнює:



Значення швидкості vтіла визначається виразами



Використовуючи вирази (22.1), (22.2) і (22.3), зміну кінетичної енергіїтіла під дією сили *F* можна подати у вигляді:.



### Робота

*Фізичну величину, яка дорівнює зміні кіне­тичної енергії тіла в результаті дії на нього сили, називають роботою.*

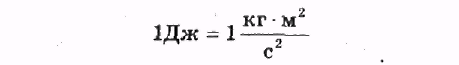
Роботу позначають літерою *А:* 

Отже, *під час збігу вектора сили з напря­мом вектора швидкості тіла, робота дорівнює добуткові сили на шлях, який пройшло тіло:*



### Одиниця роботи. Одиниця енергії

*За одиницю роботи в Міжнародній системі одиниць беруть роботу, яка здійснюєть­ся силою 1 ньютон на шляху 1 метр під час руху за напрямом вектора сили. Цю одиницю називають джоулем (Дж):*



Оскільки робота дорівнює зміні енергії, для вимірювання енергії беруть ту саму одини­цю, що й для вимірювання роботи. *Одини­ця енергії в СІ* — *1 Дж.*

### Потужність

Відношення роботи *А* до проміжку часу t*,* протягом якого вона виконувалася, назива­ють *потужністю.* Потужність позначають літерою*N:*



*Одиницю потужності в СІ називають* ***ват*** *(Вт):*

Одиницю, яка в тисячу разів більша за 1 ват, називають кіловат, у мільйон разів більшу — мегават:



Роботу, що виконується за 1 годину, коли потужність дорівнює 1 кВт, називають кі­ловат-година:

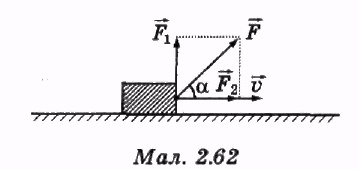


### Робота сили, напрямленої під кутом до вектора швидкості

Знайдемо зміну кінетичної енергії тіла у випадку, коли вектор сили напрямлений під кутом до вектора швидкості. Якщо век­тор сили перпендикулярний до вектора швидкості, тіло рухається рівномірно по колу. Сила є причиною зміни напряму век­тора швидкості й виникнення доцентрового прискорення. Коли рух тіла по колу рівномірний, то модуль його швидкості не змінюється і, отже, не змінюється кінетич­на енергія тіла. Якщо зміна кінетичної енергії тіла дорівнює нулю, то робота сили також дорівнює нулю:



*Якщо вектор сили напрямлений під кутом * *до вектора швидкості тіла, то робота сили на будь-якому шляху дорівнює нулю.* Розглянемо тепер загальний випадок. Не­хай на тіло діє вектор сили, що напрям­лена під кутомдо вектора швидкості тіла  Вектор сили  можна зобразити як рівнодійну двох векторів сил(мал.2.62).

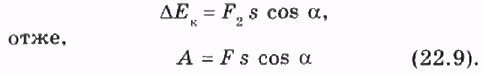


Вектор силинапрямлений перпендику­лярно до вектора швидкості тілавектор силинапрямлений паралельно до векто­ра швидкості тіла

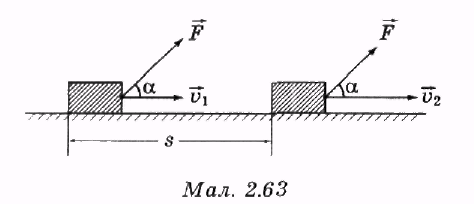
Під дією сили напрямленої перпендику­лярно до вектора швидкості кінетична енергія тіла не змінюється. Зміна кінетич­ної енергії тіла відбувається тільки під дією сили, паралельної до вектора швид­костіТому зміну кінетичної енергії тіла визначають за допомогою виразу (22.4):



Значення складовоїсили дорівнює:  тому зміна кінетичної енергії дорівнює:

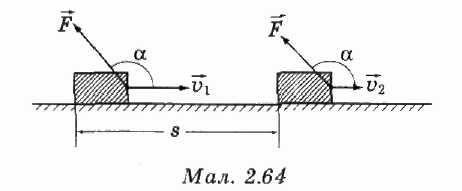


*Якщо вектор сили напрямлений під кутом до вектора швидкості тіла, то робота дорівнює добуткові сили на шлях і косинус кута між векторами сили й швидкості.* Залежно від значення кута між векторами сили й швидкості робота може мати додатне або від'ємне значення. Якщо кут лежить у межах  то робота сили  додатна (мал. 2.63).



У результаті виконання цієї роботи кіне­тична енергія тіла збільшується

Якщо кут лежить у межах, то робота сили  від'ємна. У результаті виконання цієї роботи кінетична енергія тіла зменшується,(мал. 2.64). У випадку  робота дорівнює нулю.



Наприклад, сила тяжіння виконує додатну роботу, коли тіло рухається вниз, а коли тіло рухається вгору, робота сили тяжіння набуває від'ємного значення.

### Робота сили тяжіння

Коли тіло переміщується вниз по похилій площині (мал. 2.65), сила тяжіння виконує роботу

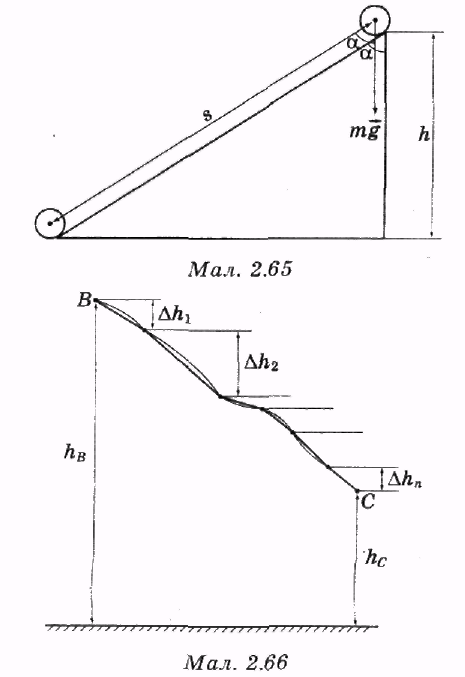


де *h* — висота похилої площини, *s* — дов­жина похилої площини.

Рух тіла в полі сили тяжіння з точки *В* в точку *С* по будь-якій траєкторії можна подумки уявити таким, що складається з пе­реміщення по похилих відрізках (мал. 2.66). Робота *А* сили тяжіння на всьому шляху з *В* до *С* дорівнює сумі робіт на ок­ремих ділянках шляху. Якщо на всьому шляху прискорення сили тяжіння можна вважати однаковим, то ця робота дорівнює:



де - висоти від поверхні Землі, на яких розташовані відповідно точки *В і С.*

****

Рівність (22.11) показує, *що робота пос­тійної сили тяжіння не залежить від траєкторії руху тіла й завжди дорівнює добуткові модуля сили тяжіння на різни­цю висот у початковому й кінцевому положення.*

Під час руху вниз робота сили тяжіння до­датна, під час руху вгору — від'ємна. Якщо після руху по якій-небудь траєкторії тіло повертається в початкову точку, по­чатковей кінцеве  значення висоти збігаються й робота сили тяжіння дорівнює нулю.

Отже, *робота сили тяжіння, коли тіло рухається по будь-якій замкненій траєкторії, дорівнює нулю.*

Розв'язуючи задачі й враховуючи залежність сили тяжіння від відстані, одер­жуємо точно такий самий кінцевий результат.

## [§23. Потенціальна енергія](" \l "Зміст)

Якщо тіло підняте над поверхнею Землі на певну висоту, а потім вільно падає на Зем­лю, його швидкість збільшується, кінетич­на енергія зростає. Збільшення кінетичної енергії тіла під час вільного падіння пока­зує, що підняте над Землею тіло має дея­кий запас енергії.

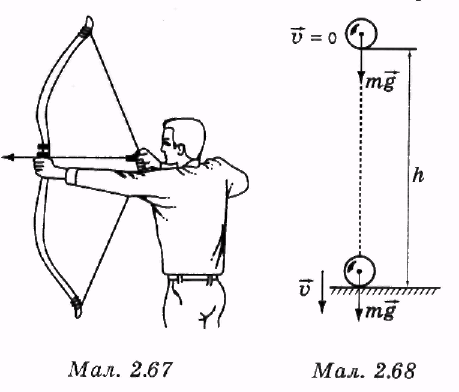
Інший приклад — виникнення кінетичної енергії поступального руху тіла за рахунок енергії деформованої пружини. Дослід показує, якщо збільшується деформація пру­жини, то збільшується кінетична енергія тіла, якому надає руху ця пружина.

### Потенціальна енергія

*Енергію, яка залежить тільки від взаємно­го розміщення тіл або від взаємного розміщення частин одного тіла, назива­ють потенціальною енергією.*

### Зв'язок між змінами кінетичної і потенціальної енергії

Під час запуску стріли із лука натягненою тятивою (мал. 2.67), у процесі вільного па­діння м'яча на Землю (мал. 2.68) кінетич­на енергія тіла зростає на стільки, на скількизменшується потенціальна енергія.



Тому *змінакінетичної енергії дорівнює зміні потенціальної енергії, узятій з протилежним знаком:*

**

### Зміна потенціальної енергії і робота

Оскільки зміна кінетичної енергії тіла дорівнює роботі діючих на нього сил *А* (22.5), то зміна потенціальної енергії з (23.1) і (22.5) дорівнює роботі діючих сил, узятій з протилежним знаком:



Під час вільного падіння вниз тіла масою m у випадку, коли силу тяжіння можна вва­жати сталою, роботу сили тяжіння  на шляху h можна вважати постійною:



З виразу (23.2) і (23.3) для зміни по­тенціальної енергії тіла в полі тяжіння Землі одержимо: 

### Потенціальна енергія тіла, піднятого над Землею

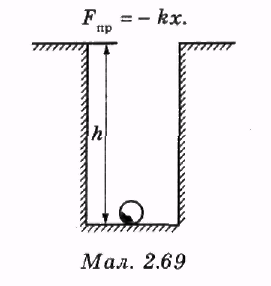
Значення потенціальної енергії тіла, що підняте над Землею, залежить від вибору початку відліку. Як правило, уважають, що потенціальна енергія біля поверхні Землі дорівнює нулю. У цьому випадку на невеликих відстанях від поверхні Землі, тобто за умови  *потенціальна енергіятіла, що перебуває на висоті h над поверхнею Землі, дорівнює добуткові маси т тіла на прискорення g вільного падіння і відстань h його від поверхні Землі:*

На відміну від кінетичної енергії посту­пального руху, яка може мати лише додатне значення, потенціальна енергія мо­же мати як додатні, так і від'ємні значен­ня. Під час відліку висоти від поверхні Землі тіло масою *т* на глибині *h* нижче від поверхні Землі має від'ємні значення по­тенціальної енергії (мал. 2.69):

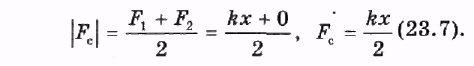


**Потенціальна енергія пружної деформації**

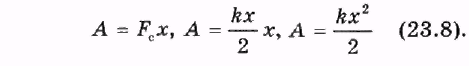
Знайдемо зміну потенціальної енергії пружної деформації під час відновлення форми пружно деформованого тіла. Якщо жорсткість тіла k, а значення деформації *х,* то значення сили пружностіза законом Гука дорівнює:



Під час відновлення форми пружини сила пружності лінійно спадає до нуля, її се­реднє значення на шляху *х* дорівнює півсумі початкового й кінцевого її значень:



Робота *А* сили пружності дорівнює:



Із виразів (23.2) і (23.8) для зміни по­тенціальної енергіїпружної деформації одержуємо вираз:



Зміна потенціальної енергіїпружної де­формації дорівнює різниці значень по­тенціальної енергії в кінцевому й початко­вому станах:

Якщо в кінцевому стані потенціальна енер­гіяпружної деформації дорівнює нулю

 *'.* то:

*Потенціальна енергія пружної деформації тіла дорівнює половині добутку ко­ефіцієнта жорсткості k на квадрат де­формації х:*

**

## [§24. Закон збереження енергії](#Зміст)

Будь-яку зміну кінетичної енергії тіл під дією гравітаційних сил або сил пружності можна розглядати як результат перетво­рення потенціальної енергії взаємодіючих тіл на кінетичну або кінетичної енергії на потенціальну.

Під час таких перетворень зміна кінетичної енергії дорівнює зміні потенціальної енер­гії, узятій з протилежним знаком (23.1):



Сума змін кінетичної і потенціальної енергії тіл, які взаємодіють гравітаційни­ми силами й силами пружності, дорівнює нулю:

Отже, сума кінетичної і потенціальної енергії тіл, які взаємодіють гравітаційними силами й силами пружності, залишається постійною:



### Повна механічна енергія

*Суму кінетичної і потенціальної енергії тіл називають повною механічною енер­гією Е:*

### Закон збереження механічної енергії

*Повна механічна енергія системи тіл, які взаємодіють між собою тільки силами тяжіння й пружності, залишається незмінною.*

Цей дослідний факт, який підтверджують найточніші експерименти, називають *законом збереження механічної енергії. З*акон збереження повної механічної енер­гії є одним із найосновніших законів ме­ханіки.

Чи завжди зменшення кінетичної енергії тіла супроводжується рівним за модулем збільшенням його потенціальної енергії? Розглянемо випадок гальмування й зупин­ки потяга. Кінетична енергія потяга змен­шилася до нуля, але його потенціальна енергія при цьому не змінилася. Отже, за­кон збереження механічної енергії не вико­нується, якщо між тілами діють сили тер­тя. Проте дослід показує, що механічний рух ніколи не зникає безслідно й ніколи не виникає сам по собі. Під час гальмування потяга нагріваються гальмівні колодки, ко­леса й рейки. Кінетична енергія потяга не зникає, а перетворюється на внутрішню енергію теплового руху атомів.

### Закон збереження і перетворення енергії

Експериментальний факт, що *під час будь яких фізичних взаємодій енергія не вини­кає і не зникає, а тільки перетворюється з однієї форми на іншу,* називають *законом збереження і перетворення енергії,*

## [§25. Механічні коливання і хвилі](" \l "Зміст)

Окрім рівномірного і рівноприскореного механічного руху тіл, у природі й техніці часто трапляються рухи тіл зі змінними прискореннями. Рух зі змінним прискорен­ням відбувається під дією сил, що зміню­ються з часом. Прикладом такого руху є *механічні коливання. Механічними коли­ваннями називають рухи тіл, які повто­рюються точно або приблизно через одна­кові проміжки часу.*

Коливання тіл відбуваються тільки в ре­зультаті їхньої взаємодії з іншими тіла­ми.

### Коливальна система

Тіла, взаємодія між якими спричиняє ко­ливання, складають *коливальну систему.* Сили, що діють усередині коливальної сис­теми, називають внутрішніми силами.

### Вільні коливання

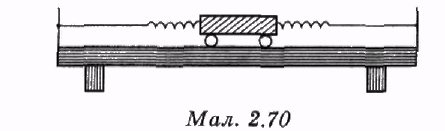
Коливання, що відбуваються в коливальній системі під дією внутрішніх сил, назива­ють *вільними коливаннями.* Коливання кулі, підвішеної на нитці, є прикладом вільних механічних коливань. Виведена одного разу зі стану рівноваги ку­ля, довгий час здійснює коливання без зовнішніх впливів.

### Вимушені коливання

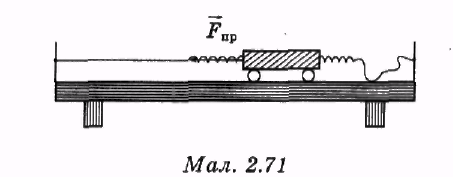
Розглянемо інший приклад механічних ко­ливань. Візьмемо велосипедний насос і бу­демо накачувати велосипедну камеру. Пор­шень у насосі рухається навперемінно впе­ред і назад, здійснюючи коливання. Проте на відміну від першого прикладу ці коли­вання припиняються одразу ж, як рука припиняє свою дію на ручку насоса. Коли­вання під дією зовнішніх періодично змінних сил називають вимушеними коли­ваннями. Коливання поршня в насосі є прикладом *вимушених коливань.*

### Умови виникнення вимушених коливань

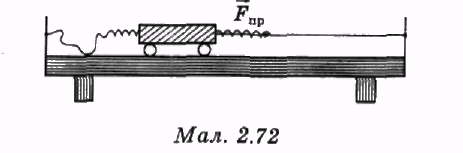
Розглянемо механізм виникнення вільних механічних коливань у системі, що скла­дається з візка на горизонтальній поверхні столу й двох пружин. Один кінець кожної пружини закріпили до візка, інші кінці пружин прив'язали нитками до стояків на столі (мал. 2.70).



Довжина ниток така, що коли візок перебу­ває на середині столу, обидві пружини не деформовані, сили пружності дорівнюють нулю. Дія сили тяжіння на візок зрівнова­жується дією сили пружності з боку столу. Тому в центрі столу візок може перебувати в спокої. Перемістимо візок управо й відпу­стимо його. Під дією сили пружності з бо­ку лівої розтягнутої пружини візок почи­нає рухатися вліво, швидкість візка збіль­шується (мал. 2.71).



Коли візок рухається, деформація пружи­ни зменшується, зменшуються сила пруж­ності й прискореная руху візка. У момент часу, коли візок проходить центр стола, си­ла пружності дорівнює нулю, дорівнює ну­лю й рівнодійна всіх інших сил, що діють на візок. Проте візок не зупиняється в цьо­му положенні. За першим законом ме­ханіки він і далі рухається рівномірно й прямолінійно. Такий рух розтягує праву пружину й приводить до виникнення сили пружності, напрямленої вправо (мал. 2.72).



Вектори сили пружності і, отже, приско­рення напрямлені протилежно до вектора швидкості, тому швидкість візка поступово

зменшується, а згодом дорівнює нулю. У момент зупинки візка деформація правої пружини досягає максимального значення, найбільше значення має й вектор сили пружності, напрямлений управо. Під дією цієї сили візок починає рухатися з приско­ренням управо і т. д. Усі етапи руху повто­рюються. У системі візок — стіл — пружи­ни виникають вільні механічні коливання.

### Умови виникнення вільних механічних коливань

Розглянувши цей приклад вільних меха­нічних коливань, можна виокремити умови їх виникнення:

*1. В одному певному положенні тіла в про­сторі, яке називають положенням рівно­ваги, рівнодійна сил, що діють на тіло, повинна дорівнювати нулю. Коли тіло виводять зі стану рівноваги, рівнодійна всіх сил не повинна дорівнювати нулю, а має бути напрямлена до положення рів­новаги.*

*2. Для того, щоб почалися вільні коливан­ня, система повинна бути виведена зі ста­ну рівноваги зовнішньою дією. Розглянемо наступні досліди з візком і пру­жинами. Перевернемо візок догори колеса­ми, змістимо зі стану рівноваги й відпусти­мо його. Візок залишається нерухомий, вільні коливання в системі не виникають. Причиною, яка перешкоджає виникненню вільних механічних коливань у цьому ви­падку, є сили тертя. Дія сили тертя спокою компенсує дію сили пружності пружини. Вільні коливання виникають у тому ви­падку, якщо сили тертя в системі ма­лі порівняно з силами, що залежать від координат.*

### Згасаючі коливання

Під час будь-якого механічного руху тіл у результаті дії сили тертя відбувається пере­творення частини механічної енергії на внутрішню енергію теплового руху атомів і молекул, відхилення тіла від положення рівноваги поступово зменшується. Змен­шення відхилень тіла від положення рівно­ваги зі спливанням часу називають *згасан­ням коливань.* Через певний час коливання припиняються. Вільні механічні коливан­ня завжди є *згасаючими коливаннями.*

### Період коливань

Мінімальний інтервал часу, через який тіло опиняється в тій самій точці простору й ру­хається з тією самою швидкістю й приско­ренням, називають *періодом коливань.* Період коливань вимірюють у секундах, по­значають літерою *Т* латинського алфавіту.

### Частота коливань

Фізичну величину, що дорівнює числу ко­ливань, здійснюваних за одну секунду, на­зивають *частотою коливань.* Частоту по­значають літерою («ню») грецького ал­фавіту.

Якщо тіло здійснило *п* коливань за *t* се­кунд, то частота коливань v дорівнює:



А період коливань *Т* дорівнює:



*Одиницю вимірювання частоти коливань називають герц (Гц),* При частоті 1 герц здійснюється одне коливання за 1 секунду.

Період і частота коливань пов'язані спів­відношенням:



### Амплітуда коливань

Однією з основних характеристик коли­вань, окрім їхнього періоду й частоти, є *амплітуда коливань.* Амплітудою меха­нічних коливань тіла називають найбільше значення зміщення тіла від положення рівноваги.

### Гармонічні коливання

Якщо координата *х* тіла, що здійснює ко­ливання вздовж осі Ох, змінюється з часом *t* за законом синуса або косинуса:



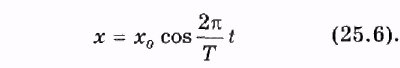
то такі коливання називають *гармонічними коливаннями.*

### Циклічна частота

У рівняннях (25.4)— амплітуда коли­вань,— частота коливань. Замість часто­тиу рівнянні гармонічних коливань мо­же бути використана циклічна частота



або період коливань



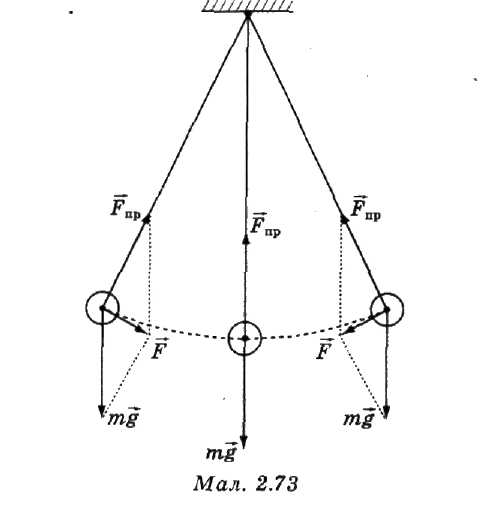
### Фаза гармонічного коливання

Величину, що стоїть під знаком синуса або косинуса називають *фазою гармонічного ко­ливання:*

### Маятник

Розглянемо коливання тіла, підвішеного на нитці, — маятника. Коли тіло нерухоме й перебуває на одній вертикальній прямій з точкою підвісу, сила пружностій сила тяжіннярівні за модулем й протилеж­но напрямлені, їхня рівнодійна дорівнює нулю. Це положення тіла є положенням рівноваги.

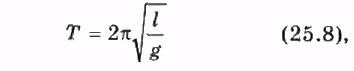
Під час відхилення тіла від положення рівноваги вправо або вліво рівнодійна сил тяжінняі пружностіне дорівнює нулю й напрямлена до положення рівнова­ги (мал. 2.73). Якщо відхилений вантаж відпустити, то під дією силивін починає рухатися з прискоренням до положення рівноваги. З наближенням до положення рівноваги кут між векторами сили тяжіння й сили пружності збільшується, рівнодійна сил змінюється за модулем і напрямом.



Після проходження положення рівноваги кут між векторами сили тяжіння й сили пружності зменшується, вектор рівнодійної сили змінюється за напрямом і знову на­прямлений до положення рівноваги. Під дією цієї сили швидкість руху тіла посту­пово зменшується й дорівнює нулю при максимальному відхиленні від положення рівноваги. Потім напрям руху змінюється, тіло знову рухається до положення рівнова­ги і т.д., процес повторюється.

### Математичний маятник

Для спрощення теоретичного розгляду за­дачі про коливання маятника можна роз­глянути таку ідеалізовану картину: тіло ма­сою *т* таких малих розмірів, що його мож­на вважати матеріальною точкою, підвіше­не на невагомій і нерозтяжній нитці за­вдовжки l. Сили тертя в підвісі й опір повітря відсутні. Таку ідеалізовану модель називають *математичним маятником.* Розрахунки свідчать, що коли кути відхи­лення від положення рівноваги малі, то період коливань математичного маятника визначають за формулою математичного маятника:



де *І* — довжина підвісу маятника, *g* — при­скорення вільного падіння. Якщо розміри тіла малі порівняно з довжиною підвісу й маса підвісу надто мала проти маси тіла, то для обчислення періоду коливань тіла на підвісі можна використовувати формулу математичного маятника.

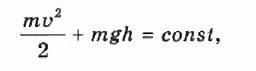
### Розвідка корисних копалин

Залежність періоду коливань маятника від прискорення сили тяжіння використову­ють на практиці для точних вимірювань прискорення сили тяжіння в різних місцях на поверхні Землі.

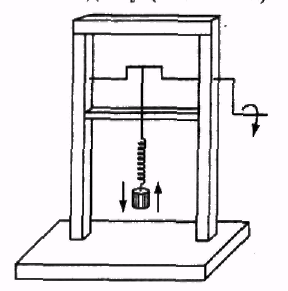
За результатами вимірювань прискорення сили тяжіння можна виявити район заля­гання корисних копалин. У тих місцях, де є корисні копалини з щільністю більшою, ніж середня щільність земної кори (напри­клад, поклади залізної руди), прискорення сили тяжіння має підвищене значення. Скупчення нафти й газу під землею пов'язані з пористими породами зниженої щільності, тому над нафтовими й газовими родовищами прискорення сили тяжіння має знижені значення.

### Перетворення енергії під час вільних ко­ливань

Під час коливань маятника в міру відхи­лення від положення рівноваги збільшу­ється його потенціальна енергія й змен­шується кінетична енергія, проте сума по­тенціальної й кінетичної енергії за законом збереження енергії залишається постійною в будь-який момент часу:



де у — швидкість маятника в довільний мо­мент часу, *h* — його висота відносно поло­ження рівноваги в той самий момент часу. Під час збудження вимушених коливань енергія тіла змінюється за рахунок дії зовнішніх сил. На особливу увагу заслуго­вує випадок дії змінної сили на систему, здатну здійснювати вільні механічні коли­вання. Як приклад такої системи можна використати вантаж на пружині, який періодично піднімається й опускається під час обертання підвісу (мал. 2.74).



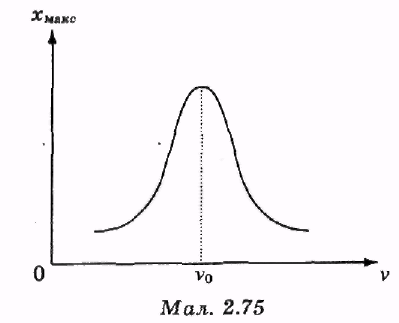
*Мал. 2.74*

Дослід показує, коли частота обертання ручки приладу, тобто частота дії зовнішньої сили збільшується плавно, то амплітуда ви­мушених коливань вантажу спочатку збіль­шується, а потім, після досягнення певного максимального значення, поступово спадає. Максимального значення амплітуда виму­шених коливань досягає, коли частота коливань сили приблизно дорівнює власній частотіколивань системи:



### Резонанс

Явище зростання амплітуди усталених ви­мушених коливань до максимального зна­чення під час наближення частоти зміни зовнішньої сили до частоти вільних коли­вань системи називають *резонансом.* Приклад залежності амплітуди  вимушених коливань від частоти  вимушу-вальної сили постійної амплітуди подано на мал. 2.75. По осі абсцис відраховують частотузміни сили, що діє на систему, по осі ординат — амплітуду  вимушених коливань.



Коли частотазміни сили й власна часто­таколивання системи збігаються, то зов­нішня сила протягом усього періоду на­прямлена в той самий бік, що й вектор швидкості коливного тіла. Тому протягом усього періоду зовнішня сила здійснює додатну роботу, збільшуючи амплітуду ко­ливань тіла.

### Умови резонансу

Оскільки під час резонансу зовнішня сила здійснює за період максимальну додатну роботу над коливальною системою, *умову резонансу* можна визначити як умову мак­симальної передачі енергії коливальній си­стемі.

### Механічні хвилі

У неперервному середовищі, що скла­дається з частинок, які взаємодіють між собою, коливання частинок в одному місці викликають вимушені коливання сусідніх частинок, які йдуть за ними і т.д. Процес поширення механічних коливань у твер­дих, рідких і газоподібних тілах називають *механічною хвилею.*

### Поперечні хвилі

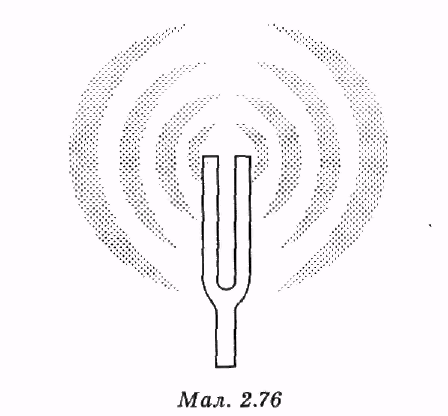
Хвилі, у яких коливання відбуваються пер­пендикулярно до напряму поширення хвилі, називають *поперечними хвилями.* Прикладом поперечних хвиль є хвилі на воді.

### Поздовжні хвилі

Хвилі, у яких коливання відбуваються вздовж напряму поширення хвилі, назива­ють *поздовжніми хвилями.*

### Звукові хвилі

Прикладом поздовжніх хвиль є звукові хвилі. Наприклад, коливання ніжок ка­мертона супроводжуються періодичними стисканнями й розрідженнями повітря біля нього. Ці процеси стискання й розрідження поширюються в повітрі на всі боки. Вони і є *звуковими хвилями* (мал. 2.76). Відчуття звуку в наших орга­нах слуху виникає під час періодичних змін тиску повітря.



### Гучність звуку

Звукові хвилі з великою амплітудою зміни звукового тиску людське вухо сприймає як гучні звуки, з малою амплітудою зміни звукового тиску — як тихі звуки.

### Висота тону

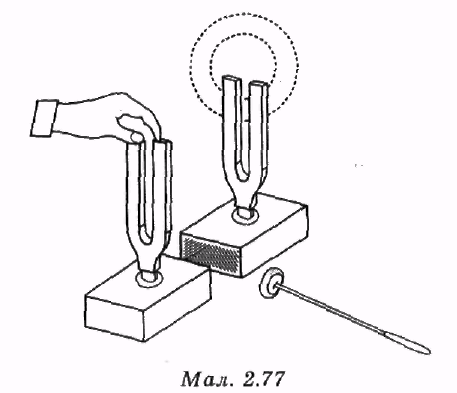
Звукові коливання високої частоти назива­ють звуками високого тону, звукові коли­вання низької частоти називають звуками низького тону.

### Інфразвук. Ультразвук

Органи слуху людини здатні сприймати звуки з частотою в межах приблизно від 20 Гц до 20 000 Гц. Поздовжні хвилі в середо­вищі з частотою зміни тиску меншою від 20 Гц називають *інфразвуком,* з частотою більшою, ніж 20 000 Гц — *ультразвуком.*

### Акустичний резонанс

Звукові хвилі, натрапляючи на будь-яке тіло, викликають вимушені коливання. Якщо частота власних вільних коливань тіла збігається з частотою звукової хвилі, то умови для передачі енергії від звукової хвилі тілу виявляються найліпшими, ам­плітуда вимушених коливань при цьому досягає максимального значення — можна спостерігати *акустичний резонанс.* Спос­терігати акустичний резонанс можна під час досліду з двома однаковими камертона­ми на резонаторних ящиках (мал. 2.77). Удар молотка по ніжці камертона збуджує звукові коливання, але звук має невелику гучність. Якщо камертон, що звучить, по­ставити на порожню дерев'яну коробку — резонатор — то гучність звуку значно зрос­тає в результаті збудження коливань стінок ящика й повітря, яке є в ящику.



Якщо встановити один камертон із резона­торним ящиком навпроти іншого й збудити коливання одного камертона, то через дея­кий час починає звучати й інший камер­тон. У цьому можна впевнитися, припи­нивши звучання першого камертона дотор­ком руки. Акустичними резонаторами є корпус гітари, корпус скрипки, труби духо­вих інструментів.

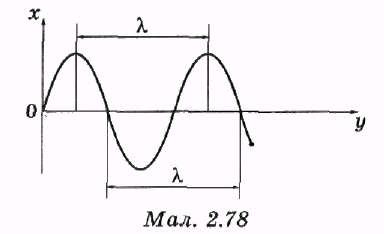


### Швидкість хвилі

Швидкість *v* поширення коливань у про­сторі називають *швидкістю хвилі.*

### Довжина хвилі

Відстань між найближчими одна до одної точками, що рухаються в будь-який мо­мент часу з однаковими швидкостями й прискореннями, називають *довжиною хвилі* (мал. 2.78). Довжину хвилі познача­ють грецькою літерою(«лямбда»).



Для швидкості *v* поширення коливань за період *Т* коливання поширюються на відстань, що дорівнює довжині хвилі



Оскільки то швидкість хвилі пов'язана з частотою коливань виразом: 

Під час виникнення хвиль їхня частота визначається частотою коливань джерела коливань, а швидкість поширення зале­жить від властивостей середовища. Тому під час поширення коливань з однією й тією самою частотою довжина хвилі в різних середовищах виявляється різною.

### Сейсмічні хвилі

У пружній земній корі можливе поширен­ня як поздовжніх, так і поперечних хвиль. *Сейсмічними хвилями* називають хвилі в земній корі, що виникають під час землет­русів. Поздовжні сейсмічні хвилі, хвилі стискання й розрідження земної кори нази­вають Р-хвилями. Швидкість їхнього по­ширення приблизно 8 км/с. Поперечні сейсмічні хвилі називають S-хвилями. Їхня швидкість дорівнює приблизно 5 км/с. Окрім Р- і S-хвиль, що поширюються в се­редині Землі, поштовх землетрусу викли­кає появу L-хвиль, що розбігаються в усі боки від епіцентру землетрусу по поверхні Землі (мал. 2.79).

Через різницю швидкостей поширення поз­довжніх і поперечних сейсмічних хвиль сейсмограф їх реєструє у різний час. За ча­сом запізнювання поперечних хвиль відносно моменту першої реєстрації поз­довжніх сейсмічних хвиль і відомими зна­ченнями швидкостей цих хвиль визнача­ють відстань до місця землетрусу.