

Основні поняття розділу «Основи динаміки»

Динаміка — це розділ механіки, який вивчає причини зміни швидкості руху тіл під впливом інших тіл.

Сила (у фізиці) є мірою взаємодії тіл, частинок або частинок і поля.

Сила (в механіці) є причиною прискорення тіл або частинок тіла.

Сила $\vec{F}$ — векторна величина.

Якщо до матеріальної точки прикладено декілька сил $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \dots, \vec{F}_n$ (рис. 20), то їх дію можна замінити дією однієї сили, яка називається рівнодійною силою ($\vec{F}_p$):

$$\vec{F}_p = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n.$$

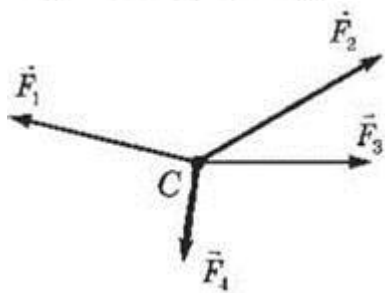


Рис. 20

Існують такі системи відліку, відносно яких поступально рухоме тіло зберігає свою швидкість сталою, якщо на нього не діють інші тіла (або вплив інших тіл компенсується).

Такі системи відліку називаються інерціальними.

Інерціальна система відліку зв'язана з далекими зорями. Будь-яка система, що рухається відносно зір рівномірно і прямолінійно, також інерціальна. У зв'язку з тим, що Земля, рухаючись відносно зір (Сонця), мало змінює швидкість, система «Земля» практично інерціальна. Отже, інерційною буде також СВ, яка рухається відносно Землі рівномірно і прямолінійно.

Явище збереження сталої швидкості (зокрема швидкості, що дорівнює нулю) називають інерцією.

Тому і СВ, відносно яких тіла рухаються зі сталою швидкістю за умови компенсації зовнішніх впливів, називаються інерціальними, а перший закон Ньютона називають законом інерції.

Принцип відносності в класичній механіці: для будь-яких механічних явищ усі інерціальні СВ є рівноправними.

Це зумовлено тим, що маса m , довжина l , проміжок часу Δt в усіх інерціальних СВ мають однакове значення (інваріантні).

Маса — фізична величина, яка кількісно характеризує інертні властивості тіла.

Інертність полягає в тому, що для зміни швидкості руху тіла даною силою потрібен деякий час. Чим більшим є цей час, тим інертнішим є тіло.

Одиницею маси в СІ є 1 кг.

Еталон маси, виготовлений зі сплаву іридію та платини, зберігається в м. Севрі поблизу Парижа.

Масу можна визначити:

1. За взаємодією тіла масою m_t з еталоном (тілом відомої маси):

$$\frac{m_t}{m_{et}} = \frac{a_{et}}{a_t}.$$

Маса як міра інертності тіла визначається відношенням модуля прискорення еталона до модуля прискорення тіла при його взаємодії з еталоном:

$$m_t = \frac{a_{et}}{a_t} m_{et}.$$

2. Зважуванням на важільних терезах, де порівнюється взаємодія тіла і важків із Землею.

3. Розрахунком її за відомою густиною речовини й об'ємом тіла:

$$m = \rho V.$$

4. Вираженням її через масу однієї молекули m_0 та кількість молекул N

$$m = m_0 N.$$

Центр маси — точка, через яку повинна проходити лінія дії сили, щоб тіло рухалось поступально.

На рис. 21 точка С — центр маси тіла.

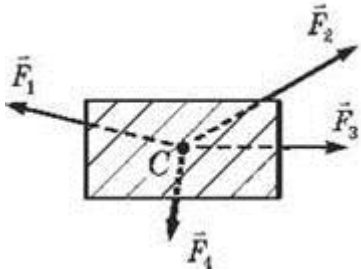


Рис. 21

Центр маси системи рухається як матеріальна точка, у якій зосереджена маса всієї системи і на яку діє сила, що дорівнює геометричній сумі всіх зовнішніх сил, що діють на тіло.

Сила, яка діє на тіло, дорівнює добутку маси тіла на прискорення, яке надається даною силою:

$$\vec{F} = m\vec{a}.$$

Ця сила тільки надає тілу прискорення і не залежить від дії інших сил на це тіло.

Основне рівняння динаміки. Якщо на тіло діє кілька сил, то геометрична сума всіх зовнішніх сил дорівнює добутку маси тіла на прискорення, з яким рухається тіло під впливом усіх сил:

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = m\vec{a}.$$

Одиницею сили є 1 Н (ньютон).

1 Н — це постійна сила, яка надає тілу масою 1 кг прискорення 1 м/с²:

$$1 \text{ Н} = 1 \text{ кг} \frac{\text{м}}{\text{с}^2}.$$

Межі застосування другого закону Ньютона

Цей закон застосовується:

1) під час розглядання руху тіл зі швидкостями, набагато меншими від швидкості світла ($v \ll c$);

2) в інерціальній системі відліку.

Другий закон Ньютона в імпульсній формі застосовується як у класичній механіці (механіці Ньютона), так і в релятивістській (механіці Ейнштейна).

Другий закон Ньютона в імпульсній формі. Імпульс сили, що діє на тіло, дорівнює зміні імпульсу тіла:

$$\vec{F}\Delta t = m\vec{v} - m\vec{v}_0, \text{ або } \vec{F}\Delta t = \Delta\vec{p}.$$

Імпульс тіла — це векторна величина, яка дорівнює добутку маси тіла на його швидкість:

$$\vec{p} = m\vec{v}.$$

$\frac{M}{C}$

Одиницею імпульсу є 1 кг $\frac{M}{C}$.

Тіла діють одне на одне із силами, спрямованими вздовж однієї прямої, рівними за модулем і протилежними за напрямом:

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2, F_1 = F_2.$$

Сили взаємодії тіл виникають парами і мають однакову природу (рис. 22, а, б):

$$\vec{P} = -\vec{N},$$

$$\vec{F}_{\text{тер}} = -\vec{F}'_{\text{тер}}.$$

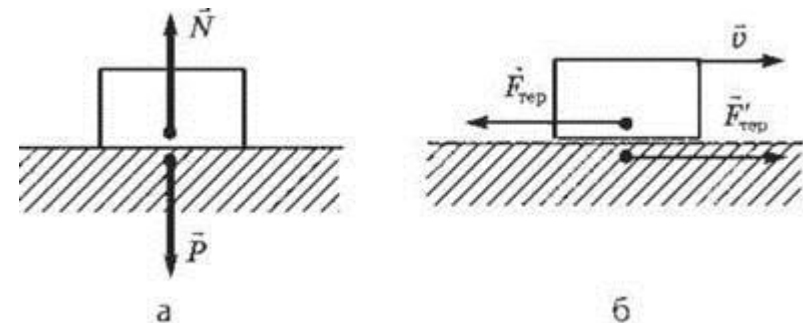


Рис. 22

Сили взаємодії тіл прикладені до різних тіл і тому не мають рівнодійної.

Сила натягу нитки (пружини), яка з'єднує тіла, діє кінцями нитки на кожне тіло із силою натягу (рис. 23):

$$\vec{F} = -\dot{\vec{F}}_n(\ddot{T}),$$

$$\vec{F} = -\vec{F}_n$$

Рис. 23

Сила тертя — це сила, яка виникає під час руху одного тіла по поверхні іншого і перешкоджає цьому руху.

Наприклад, двигун автомобіля обертає ведучі колеса. Тертя по землі перешкоджає цьому обертанню, штовхаючи колесо вперед (таким чином, виникає сила тяги автомобіля) (рис. 24, а).

Сила тертя ковзання $\vec{F}_{\text{тер.ковз.}}$ виникає при ковзанні одного тіла по поверхні іншого. Її напрям протилежний швидкості руху тіла (рис. 24, б).

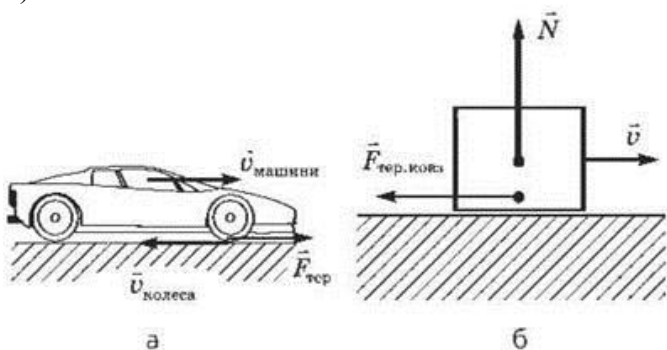


Рис. 24

Модуль сили тертя ковзання прямо пропорційний силі нормальної реакції опори N :

$$F_{\text{тер.ковз.}} = \mu N,$$

де μ — безрозмірна величина.

Коефіцієнт пропорційності μ — коефіцієнт тертя ковзання, який залежить від виду речовин тіл, які стикаються, стану їхніх поверхонь та швидкості ковзання одного тіла відносно іншого.

При розв'язанні багатьох задач можна користуватися деяким середнім значенням коефіцієнта тертя ковзання. При малих швидкостях можна вважати, що він дорівнює коефіцієнту тертя спокою (рис. 25):

$$\mu_{\text{тер.ковз.}} = \mu_{\text{тер.сп.}}$$

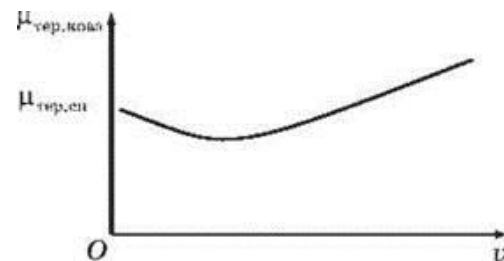


Рис. 25

Модуль сили тертя ковзання під час руху по горизонтальній поверхні:

$$F_{\text{тер.ковз.}} = \mu mg, \text{ оскільки } N = mg.$$

Модуль сили тертя ковзання під час руху по поверхні, яка утворює з горизонтом кут α :

оскільки

$$F_{\text{тер.ковз.}} = \mu mg \cos \alpha,$$

$$N = mg \cos \alpha.$$

Сила тертя спокою $\vec{F}_{\text{тер.сп.}}$ однакова за модулем і спрямована протилежно тій зовнішній силі $\vec{F}$, яка спричиняє ковзання одного тіла по іншому (рис. 26).

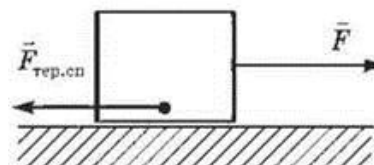


Рис. 26

Максимальне значення модуля сили тертя спокою:

$$F_{\text{тер. сп}} = \mu_{\text{сп}} N.$$

Тертя кочення виникає при коченні одного тіла по поверхні іншого.

Модуль сили тертя кочення дорівнює відношенню добутку коефіцієнта тертя кочення k , модуля сили нормальної реакції опори N до радіуса R тіла, що котиться:

$$F_{\text{тер. коч}} = \frac{kN}{R}.$$

Для більшості поверхонь сила тертя кочення менша за силу тертя ковзання. Тому широко практикується заміна тертя ковзання тертям кочення (кулькові та роликові підшипники):

$$F_{\text{тер. коч}} \ll F_{\text{тер. коз}}.$$

При дуже великих швидкостях сухе тертя переходить у в'язке, оскільки між поверхнями утворюється прошарок повітря.

В'язке тертя виникає при русі твердого тіла у рідині або газі. Сила

в'язкого тертя $\vec{F}_{\text{тер.в'язк}}$ спрямована проти швидкості руху тіла (рис. 27).

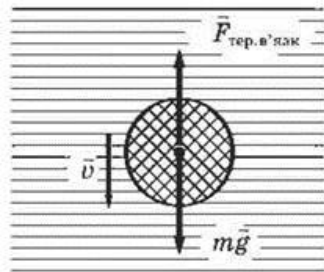


Рис. 27

Особливості в'язкого тертя

1. Сила тертя спокою відсутня:

$$F_{\text{тер. сп}} = 0.$$

2. Модуль сили в'язкого тертя залежить від швидкості руху тіла: при малих швидкостях:

$$F_{\text{тер. в'язк}} = \beta_1 v,$$

при великих швидкостях:

$$F_{\text{тер. в'язк}} = \beta_2 v^2,$$

де β_1, β_2 — коефіцієнти пропорційності між модулем сили в'язкого тертя та швидкістю руху тіла. Характеризує обтікання поверхні тіла та в'язкість середовища.

Сили пружності — це сили, які виникають при деформації тіла і перешкоджають цій деформації.

Сили пружності спрямовані перпендикулярно до поверхні деформованого тіла ($\vec{N}$) — наприклад, нормальна реакція опори (сила пружності підставки), або вздовж нитки ($\vec{T}$) (рис. 28, а, б).

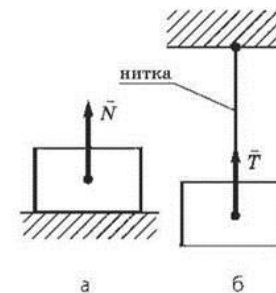


Рис. 28

Деформацією твердого тіла називають зміну форми та об'єму тіла під зовнішнім впливом.

Розрізняють пружну і пластичну деформації.

Пружна деформація повністю зникає після припинення дії зовнішніх сил.

Пластична деформація не зникає після припинення дії зовнішніх сил.

У випадку пружної деформації модуль сили пружності визначається за законом Гука: сила пружності при пружній деформації прямо пропорційна абсолютному подовженню тіла і протилежно до нього напрямлена (рис. 29):

$$F_{\text{пруж } x} = -kx, [x] = \text{м}, [k] = \frac{\text{Н}}{\text{м}}.$$

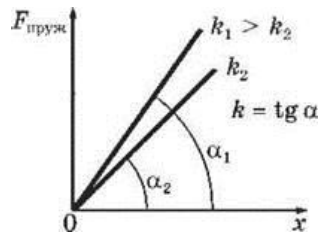


Рис. 29

Абсолютне подовження тіла (x) визначається різницею кінцевої і початкової довжин тіла:

$$x = l - l_0 = \Delta l.$$

Тут k — коефіцієнт пружності, або жорсткості, залежить від геометричних розмірів тіла (S, l_0) та виду речовини (E) (S — площа поперечного перерізу, l_0 — початкова довжина тіла, E — модуль пружності, або модуль Юнга):

$$k = \frac{SE}{l_0},$$

$$[S] = \text{м}^2, [l_0] = \text{м}, [E] = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = \text{Па}.$$

Одиниця жорсткості — ньютон на метр:

$$[k] = \frac{\text{Н}}{\text{м}}.$$

Модуль Юнга (модуль пружності) чисельно дорівнює механічній напрузі, яка виникає в тілі при подовженні тіла на величину початкової його довжини ($l = 2l_0$).

Модуль Юнга характеризує опірність матеріалу пружної деформації розтягу або стиску.

Види пружної деформації

1. Деформація розтягу або стиску.

Закон Гука в цьому випадку має вигляд: механічна напруга (σ) при пружній деформації прямо пропорційна відносному подовженню тіла (ϵ) (рис. 30):

$$\sigma = E \cdot |\epsilon|.$$

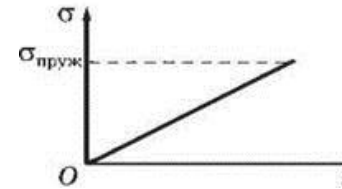


Рис. 30

Максимальна напруга, за якої ще виконується закон Гука, називається межею пропорційності ($\sigma_{\text{п}}$).

Відносне подовження тіла (ϵ) — це величина, яка дорівнює відношенню абсолютного подовження (Δl) тіла до його початкової довжини (l_0):

$$\frac{|\Delta l|}{l_0} = |\epsilon|.$$

Механічна напруга (σ) — це відношення модуля сили пружності ($F_{\text{пр}}$) до площі поперечного перерізу (S) тіла (рис. 31):

$$\sigma = \frac{F_{\text{пруж}}}{S}, [\sigma] = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = \text{Па}.$$

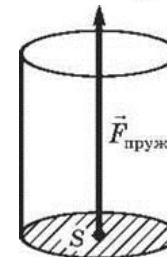


Рис. 31

2. Деформація вигину та кручення (рис. 32, а).

3. Деформація зсуву (рис. 32, б).

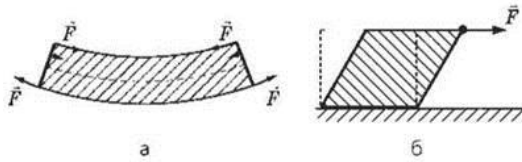


Рис. 32

Сили пружності й тертя є проявом електромагнітних сил.

Сили тяжіння і всесвітнього тяжіння є гравітаційними силами. Вони є виявом гравітаційних полів.

Гравітаційне поле характеризує зміну фізичних і геометричних властивостей простору поблизу масивних тіл і може бути виявлене за силовим впливом на інші фізичні тіла.

Сила всесвітнього тяжіння — сила, яка обумовлює притягання всіх тіл у Всесвіті.

Вона визначається за законом всесвітнього тяжіння, якщо тіла можна прийняти за матеріальні точки або кулі з однорідним чи радіальним розподілом густини (r_{12} — відстань між центрами мас взаємодіючих тіл) (рис. 33).

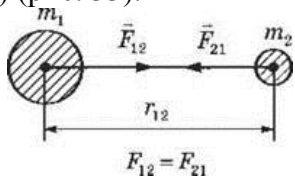


Рис. 33

Закон всесвітнього тяжіння, відкритий Ньютоном: дві матеріальні точки притягуються одна до одної із силами, модуль яких прямо пропорційний добутку їх мас і обернено пропорційний квадрату відстані між ними:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r_{12}^2}.$$

Коефіцієнт пропорційності називають гравітаційною сталою та позначають G .

Гравітаційна стала чисельно дорівнює силі притягання між двома матеріальними точками масою по 1 кг, розташованими на відстані 1 м:

$$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{м}^3}{\text{кг} \cdot \text{с}^2}.$$

Одним із проявів сили всесвітнього тяжіння є сила притягання тіла до Землі, яка називається силою тяжіння і за другим законом Ньютона дорівнює mg , де $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ —

прискорення вільного падіння біля поверхні Землі:

$$\vec{F}_\tau = m\vec{g}.$$

Прискорення вільного падіння біля поверхні Землі можна обчислити за формулою:

$$g = \frac{GM_3}{R_3^2}.$$

Прискорення вільного падіння на висоті A над поверхнею Землі:

$$g' = \frac{GM_3}{(R_3 + h)^2},$$

де $M_3 = 6 \cdot 10^{24} \text{ кг}$ — маса Землі;

$R_3 = 6400 \text{ км}$ — середній радіус Землі.

Вага тіла — це сила, з якою тіло діє на опору чи підвіс унаслідок притягання його до Землі.

Якщо опора перебуває в спокої або рухається рівномірно і прямолінійно, то вага тіла за величиною і напрямом збігається з силою тяжіння. Але вага прикладена до опори $\vec{P} = -\vec{N}$ чи підвісу, а сила тяжіння — до центра маси тіла $\vec{N} = -m\vec{g}$, отже, $\vec{P} = -m\vec{g}$.

Якщо опора горизонтальна, вага тіла є силою пружності, з якою тіло діє на опору (рис. 34).

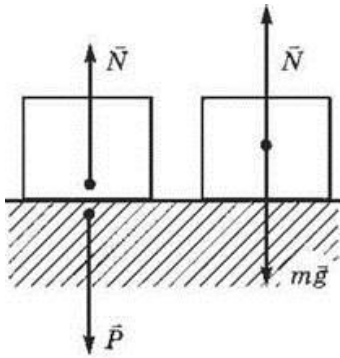


Рис. 34

Якщо опора — похила площина, то вага тіла — рівнодійна сил пружності й тертя спокою, з якими тіло діє на опору (рис. 35):

$$\vec{P} = -\vec{Q} \text{ або } \vec{P} = -(\vec{N} + \vec{F}_{\text{тер.сп}}),$$

де $\vec{Q}$ — сила реакції опори; $\vec{N}$ — нормальна реакція опори; $\vec{F}_{\text{Н.Т}}$ — сила нормального тиску.

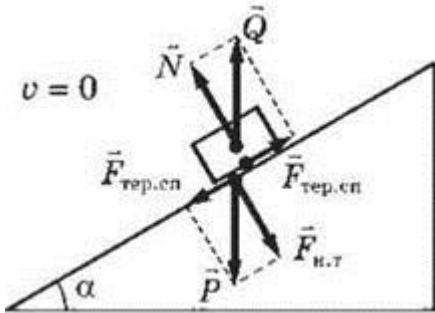


Рис. 35

Вага тіла, яке рухається з прискоренням, змінюється.

Якщо прискорення тіла напрямлене вертикально вгору, то його вага збільшується:

$$P = m(g + a).$$

Якщо $a = ng$, то виникає перевантаження у $(n+1)$ разів:

$$P = mg(n + 1).$$

Перевантаження показує, у скільки разів збільшується вага тіла, яке рухається з прискоренням, порівняно з вагою тіла, яке перебуває в спокої на горизонтальній опорі.

Якщо прискорення тіла напрямлене вертикально вниз, то модуль ваги тіла дорівнює:

$$P = m(g - a).$$

Якщо прискорення тіла дорівнює прискоренню вільного падіння, то вага тіла дорівнює нулю (стан невагомості):

$$\vec{a} = \vec{g}, \quad \vec{P} = 0.$$

Невагомість — це такий стан тіла, при якому відсутня внутрішня напруженість, обумовлена силою тяжіння.

Причина невагомості полягає в тому, що сила тяжіння надає тілу і його опорі однакового прискорення. Цей висновок справедливий для всіх тіл, які рухаються тільки під дією сили тяжіння.

Якщо прискорення тіла напрямлене горизонтально, то модуль ваги визначається за формулою:

$$P = m\sqrt{g^2 + a^2}.$$

Вага тіла напрямлена під кутом α до вертикалі (рис. 36):

$$\tan \alpha = \frac{a}{g}.$$

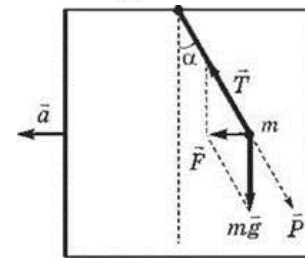


Рис. 36

Тіло, кинуте горизонтально, рухається по параболічній траєкторії:

його рух складається із руху горизонтального зі сталою швидкістю $\vec{v}_0$ і вільного падіння з нульовою початковою швидкістю.

На рис. 37 зображено рух тіла, кинутого горизонтально.

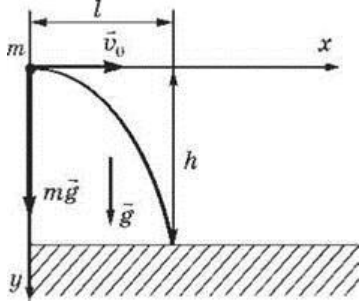


Рис. 37

Дальність польоту тіла:

$$l = v_0 t.$$

Висота падіння тіла:

$$h = \frac{gt^2}{2}.$$

Швидкість тіла $\vec{v}$ під час руху по параболі напрямлена по дотичній

у будь-якій точці траєкторії і дорівнює геометричній сумі $\vec{v}_0$ і $\vec{gt}$ ($\vec{v}_0$ — початкова швидкість тіла):

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{gt}.$$

Модуль швидкості тіла, кинутого горизонтально, обчислюємо за формулою (рис. 38):

$$v = \sqrt{v_0^2 + (gt)^2}.$$

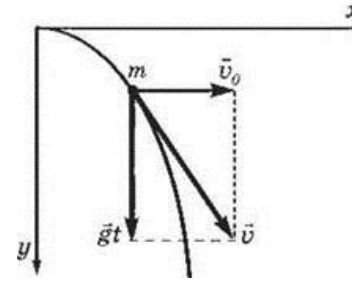


Рис. 38

Траєкторія руху тіла — парабола (рис. 39).

Дальність польоту тіла, кинутого під кутом α до горизонту:

$$l = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g}.$$

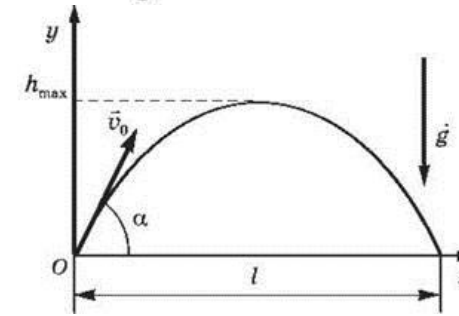


Рис. 39

Максимальна висота піднімання тіла ($\pi > \alpha > 0$):

$$h_{\max} = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g}.$$

Час руху:

$$t_{\text{рух}} = 2t_{\text{піа}} \frac{2v_0 \sin \alpha}{g}.$$

Перша космічна швидкість — це та швидкість, яку необхідно надати тілу, кидаючи його із Землі, щоб воно стало штучним супутником Землі (на невеликій, порівняно з радіусом Землі, висоті).

Значення цієї швидкості обчислюється за формулою

$$v = \sqrt{gR_3},$$

де $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ поблизу поверхні Землі;

$R_3 = 6400 \text{ км}$ — радіус Землі.

Орбітальна швидкість — це швидкість, яку повинен мати штучний супутник Землі на орбіті висотою h над поверхнею Землі.

Модуль орбітальної швидкості:

$$v = \sqrt{\frac{GM_3}{R_3 + h}},$$

де h — висота над Землею; R_3 — радіус Землі; M_3 — маса Землі; G — гравітаційна стала.

Орбітальна швидкість напрямлена по дотичній до даної точки траєкторії, тобто перпендикулярно до радіуса орбіти (рис. 40).

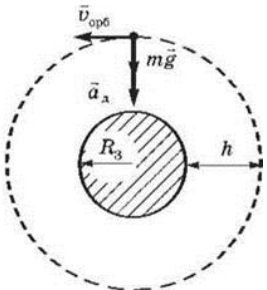


Рис. 40

Загальна умова рівноваги тіла. Для того щоб тіло перебувало в рівновазі, необхідно, щоб дорівнювали нулю геометрична сума прикладених до нього сил і алгебраїчна сума моментів сил відносно можливої осі обертання:

$$\begin{cases} \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = 0, \\ M_1 + M_2 + \dots + M_n = 0. \end{cases}$$

Виконання цих умов не заважає, проте, тілу виконувати рівномірний прямолінійний поступальний рух або обертання з постійним періодом обертання.

Види рівноваги:

- стійка,
- нестійка,
- байдужа.

Рівновага тіла стійка, якщо при малому відхиленні від положення рівноваги рівнодійна сил, прикладених до тіла, повертає його до положення рівноваги (рис. 43, а).

Рівновага тіла нестійка, якщо при малому відхиленні тіла від положення рівноваги рівнодійна сил, прикладених до тіла, віддаляє його від цього положення (рис. 43, б).

Рівновага називається байдужою, якщо тіло, виведене з певного стану рівноваги, залишається в рівновазі в новому положенні (рис. 43, в).

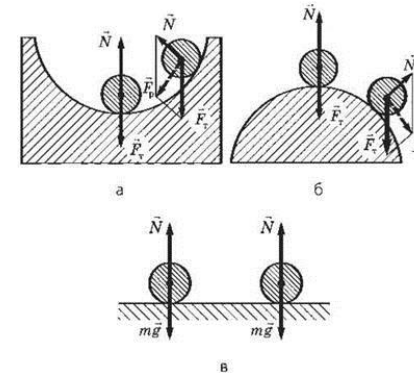


Рис. 43

Рівновага тіла, яке має вісь обертання, стійка за умови, що його центр тяжіння розташований нижче від осі обертання.

Для максимально стійкої рівноваги центр тяжіння має перебувати в найбільш низькому із можливих для нього положень (рис. 44).

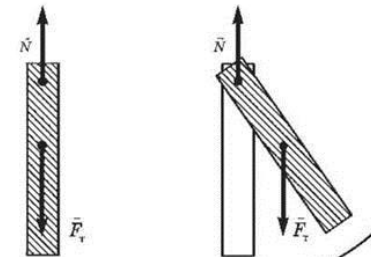


Рис. 44