

4 НЕІНЕРЦІАЛЬНІ СИСТЕМИ ВІДЛІКУ

§ 4.1. Сили інерції

Закони Ньютона, як відомо, справедливі лише в тих системах відліку, які рухаються одні відносно одних прямолінійно і рівномірно. Такі системи відліку називаються **інерціальними системами відліку**. В таких системах відліку основним рівнянням руху матеріальної точки є рівняння, яке виражає другий закон Ньютона

$$\vec{F} = m\vec{a} . \quad (4.1)$$

В інерціальних системах відліку єдиною причиною прискореного руху тіла є сили, які діють на нього з боку інших тіл. Сила завжди є результатом взаємодії матеріальних тіл.

Однак, на практиці часто доводиться мати справу з системами відліку, які рухаються відносно інерціальних систем відліку з прискоренням. Такі системи відліку називаються **неінерціальними**. В неінерціальних системах відліку закони Ньютона у тому вигляді, в якому вони записані в попередньому розділі, не справджуються. Матеріальна точка в неінерціальній системі відліку може рухатися прискорено під дією сил, виникнення яких не можна пояснити дією якихось окремих тіл. Їх поява зумовлена тим, що система відліку рухається прискорено відносно інерціальної системи відліку, якою може бути, наприклад, Земля. Так, при раптовому гальмуванні автобуса пасажери зазнають прискореного відхилення в напрямку руху. При повороті автобуса, тобто при переході з прямолінійного руху на криволінійний, пасажери відхиляються в бік, протилежний до центра траєкторії його руху. В наведених прикладах прискорення пасажирів ніяк не є результатом дії на них якихось сил з боку інших тіл. Таким чином, в неінерціальних системах відліку існують прискорення, які не зв'язані з силами, що відомі в інерціальних системах відліку. Допускається, що в неінерціальних системах відліку, так само як і в інерціальних, прискорення викликається силами, але поряд із “звичайними” силами взаємодії (контактні сили) існують ще й особливі сили, які називаються **силами інерції**.

Перший закон Ньютона в неінерціальних системах немає сенсу. Оскільки в неінерціальних системах відліку крім сил взаємодії існують ще і сили інерції, то третій закон Ньютона настільки спотворюється, що і він втрачає чіткий фізичний зміст. Для сил інерції протидії не існує. Сили інерції зумовлені властивістю тіл зберігати стан спокою або рівномірного прямолінійного руху.

Другий закон Ньютона в неінерціальних системах формулюється як і раніше (3.2), однак, поряд із силами взаємодії необхідно враховувати і сили інерції, які зумовлюються прискореннями руху неінерціальної системи відносно інерціальної. Тому другий закон Ньютона в неінерціальних системах має вигляд

$$m\vec{a}' = \vec{F} + \vec{F}_{in} , \quad (4.2)$$

де \vec{a}' – прискорення тіла, визначене в неінерціальній системі відліку, \vec{F} – “звичайні” сили

взаємодії, \vec{F}_{in} – **сили інерції**.

Отже, сили інерції враховуються, щоб забезпечити в інерціальній системі відліку ті прискорення, які фактично існують, але пояснити їх звичайними силами взаємодії можна лише частково.

Якщо врахувати, що:

$$\vec{F} = m\vec{a}, \quad (4.3)$$

де \vec{a} – прискорення в інерціальній системі відліку, то з формули (4.2) отримаємо:

$$\vec{F}_{in} = m(\vec{a}' - \vec{a}). \quad (4.4)$$

Тут прискорення \vec{a} відносно інерціальної системи відліку називають **абсолютним**, а прискорення \vec{a}' відносно неінерціальної системи відліку – **відносним**. Таким чином, сили інерції зумовлюють різницю між відносним і абсолютним прискореннями. Отже, сили інерції існують лише в неінерціальних системах відліку. В інерціальних системах відліку ці сили не діють.

Якщо прискорення неінерціальної системи відліку відносно інерціальної позначити через \vec{a}_0 , то вираз для сил інерції в неінерціальній системі, яка рухається прямолінійно, матиме такий вигляд:

$$\vec{F}_{in} = m(\vec{a}' - \vec{a}) = -m\vec{a}_0,$$

або

$$\vec{F}_{in} = -m\vec{a}_0. \quad (4.5)$$

Знак “–” тут означає, що сила інерції напрямлена протилежно до прискорення неінерціальної системи. Отже, сила інерції виражає вплив прискорення неінерціальної системи відліку на характер руху відносно цієї системи; це та величина, яку необхідно додати до істинної сили \vec{F} , щоб сума стала рівною $m\vec{a}'$ ($m\vec{a}' = \vec{F} + \vec{F}_{in}$), яка спостерігається в неінерціальній системі відліку.

Сили інерції є реальними силами, оскільки реально існують прискорення в неінерціальних системах відліку. Можна вказати конкретні фізичні наслідки дії сил інерції. Наприклад, у вагоні поїзда чи салоні автобуса сили інерції можуть призвести до цілком реального і відчутного результату – каліцтва пасажирів.

§ 4.2. Сили інерції у системах відліку, які рухаються прямолінійно

Нехай неінерціальна система відліку рухається прямолінійно уздовж осі X з прискоренням \vec{a}_0 відносно інерціальної системи відліку. Прикладом такої системи може бути візок, що рухається з прискоренням \vec{a}_0 , з прикріпленням на ньому маятником (рис. 4.1). Під час прискореного руху візка маятник відхиляється від вертикального положення на кут φ .

З точки зору спостерігача, який знаходиться в інерціальній системі, на маятник діють лише сила тяжіння $m\vec{g}$, сила реакції \vec{N} з боку нитки (підвісу маятника) і сила $\vec{F} = m\vec{a}_0$. Умовою рівноваги є

$$\vec{F} = m\vec{a}_0 = \vec{P} + \vec{N}. \quad (4.6)$$

З точки зору спостерігача, який знаходиться в неінерціальній системі (в системі, пов'язаній з візком), відхилений маятник знаходиться в стані спокою, тобто рівнодійна сил, які діють на кульку, дорівнює нулю. Оскільки кулька відхилена в напрямку, протилежному руху візка, то на маятник, крім сил \vec{P} і \vec{N} , діє ще і сила інерції \vec{F}_{in} (рис. 4.1), рівнодійна яких

$$\vec{P} + \vec{N} + \vec{F}_{in} = 0. \quad (4.7)$$

Порівнюючи формули (4.6) і (4.7), знаходимо, що на кульку діє сила

$$\vec{F}_{in} = -m\vec{a}_0.$$

Це і є сила інерції, величина якої визначається величиною прискорення неінерціальної

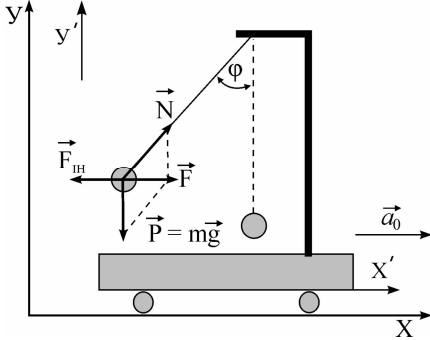


Рис. 4.1

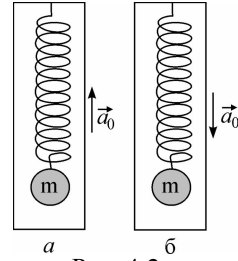


Рис. 4.2

системи (рухомого візка) відносно інерціальної системи і направлена в бік, протилежний руху неінерціальної системи (візка).

Дію таких сил інерції у поступальному русі спостерігаємо у повсякденному житті, зокрема в засобах пересування (ліфтах, автобусах, тролейбусах тощо). Так, при русі ліфта вгору вага тіла виміряна спостерігачем в ліфті дорівнює (рис. 4.2, а)

$$\vec{P} = m\vec{g} + m\vec{a}_0,$$

а при русі ліфта вниз (рис. 4.2, б)

$$\vec{P} = m\vec{g} - m\vec{a}_0,$$

де $m\vec{a}_0 = \vec{F}_{in}$ – сила інерції, \vec{a}_0 – прискорення ліфта відносно корпусу будинку.

§ 4.3. Відцентрова сила інерції

Нехай тіло, прив'язане до мотузки, рухається по колу радіуса R зі сталою кутовою швидкістю ω . Площина руху тіла перпендикулярна поверхні Землі (рис. 4.3).

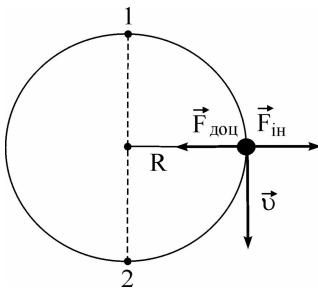


Рис. 4.3

З точки зору нерухомого спостерігача тіло рухається з доцентровим прискоренням

$$\vec{a}_n = \frac{\vec{v}^2}{R} = \vec{\omega}^2 R,$$

де \vec{v} – лінійна швидкість тіла. Це означає, що на тіло діє сила, яка отримала назву **доцентрової сили**

$$\vec{F}_{доц} = -m\vec{a}_n = -m\frac{\vec{v}^2}{R} = -m\vec{\omega}^2 R, \quad (4.7, а)$$

яка направлена по радіусу до центра кола, і за величиною дорівнює силі натягу мотузки.

Спостерігач, зв'язаний з рухомою системою відліку, бачить, що тіло знаходиться в спокої. Це означає, що на кульку діє сила, направлена по радіусу від центра, яка зрівноважується до-

центровою силою; її називають **відцентровою силою** (рис. 4.3). Це сила інерції і згідно (4.7)

$$\vec{F}_{\text{від}} = \vec{F}_{\text{ін}} = m\omega^2 R. \quad (4.8)$$

Із формули (4.8) видно, що сила інерції прямо пропорційна масі тіла і його відстані від центра обертання системи. Сили інерції можуть досягати великих значень.

Коли тіло знаходиться в стані спокою, сила натягу мотузки (вага тіла) дорівнює силі тяжіння

$$\vec{F} = \vec{P} = m\vec{g}.$$

Якщо ж тіло рухається по колу, то ця сила в кожній точці кола відмінна від \vec{P} і залежить від величини сили інерції. Так, наприклад, в точці 2 (рис. 4.3) сила натягу мотузки дорівнює

$$\vec{F} = \vec{P} + \frac{m\vec{v}^2}{R} \quad (4.9)$$

і є найбільшою. В точці 1 сила натягу мотузки дорівнює різниці величини відцентрової сили і ваги тіла:

$$\vec{F} = \frac{m\vec{v}^2}{R} - \vec{P}. \quad (4.10)$$

Дією відцентрової сили інерції пояснюється залежність прискорення вільного падіння \vec{g} від географічної широти. На екваторі ця сила найбільша, тому там \vec{g} найменше.

Дію відцентрових сил інерції широко використовують в техніці (відцентрові насоси, сепаратори, центрифуги).

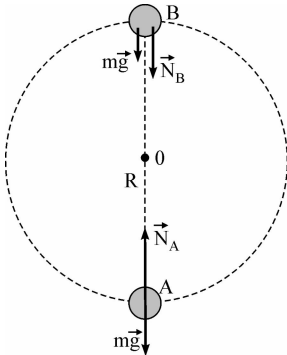


Рис. 4.4

Приклад 4.1. Кулька, яка прив'язана до кінця нитки, обертається зі сталою швидкістю у вертикальній площині по колу з радіусом $R = 95,5$ см. Розрахувати натяг нитки, коли кулька знаходиться: а) в найнижчій точці траєкторії (т. А) і б) в найвищій точці траєкторії (т. В) (рис. 4.4). Лінійна швидкість кульки $v = 3,15$ м/с, а її маса $m = 0,335$ кг.

Розв'язок. а) Натяг нитки в точці А визначається формулою (4.9):

$$N_A = m\left(\frac{v^2}{R} + g\right) = 0,335 \text{ кг} \left[\frac{(3,15 \text{ м/с})^2}{0,965 \text{ м}} + 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \right] = 6,73 \text{ Н},$$

в точці В формулою (4.10):

$$N_B = m\left(\frac{v^2}{R} - g\right) = 0,335 \text{ кг} \left[\frac{(3,15 \text{ м/с})^2}{0,965 \text{ м}} - 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \right] = 0,16 \text{ Н}.$$

§ 4.4. Сила Коріоліса

Інший вид інерціальних сил, який спостерігається в системах, що обертаються, називається **силою Коріоліса***.

Нехай, наприклад, платформа обертається з кутовою швидкістю $\vec{\omega}$, а тіло масою m рухається по цій платформі з початковою швидкістю \vec{v} від центра до краю платформи (рис. 4.5).

* Коріоліс Г. Г. (1792 – 1843) – французький фізик і інженер.

Спостерігач, зв'язаний з нерухомою системою відліку, буде стверджувати, що тіло рухається рівномірно прямолінійно до краю платформи, однак, оскільки платформа обертається,

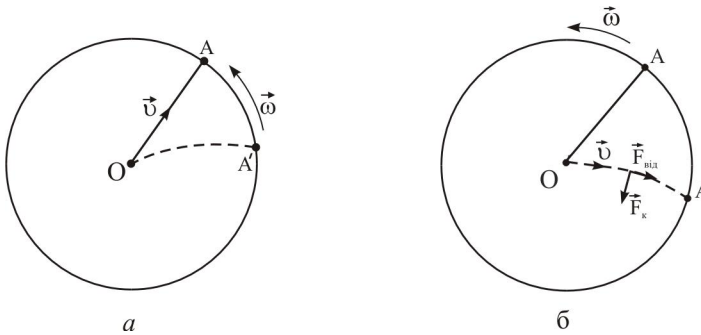


Рис. 4.5

то тіло попаде не в точку A, а в точку A'. З точки зору спостерігача, який знаходиться на платформі (зв'язаного з рухомою системою відліку), тіло рухатиметься по траєкторії OA', тобто відхилиться вправо. Спостерігач, який знаходиться в рухомій системі відліку, пояснює викривлення траєкторії руху тіла дією на нього сили, перпендикулярної до напрямку руху тіла. Цією силою є **сила інерції Коріоліса**:

$$\vec{F}_k = 2[\vec{v}, \vec{\omega}]m. \quad (4.11)$$

де $2[\vec{v}, \vec{\omega}] = \vec{a}_k$ – прискорення Коріоліса. Сила Коріоліса діє тільки на тіла, які перебувають у русі відносно неінерціальних систем відліку, яке рівномірно обертається, і залежить від швидкості їхнього руху. Ця сила над тілом не виконує роботи, а тільки змінює напрямок його руху.

Зауважимо, що на нерухоме тіло, яке знаходиться на рухомій платформі, діє тільки відцентрова сила інерції, яка направлена по радіусу від центра. На рухоме тіло крім відцентрової сили діє ще й сила Коріоліса, яка направлена перпендикулярно до напрямку руху тіла (рис. 4.5, б). Тому при складанні рівняння руху (рівняння 2-ого закону Ньютона) в системі відліку, що обертається, крім сил взаємодії (контактних сил), потрібно врахувати відцентрову силу, яка за величиною дорівнює доцентровій силі (4.8), та силу Коріоліса (4.11). Тоді рівняння руху тіла відносно системи, що обертається, має такий вигляд

$$\vec{F}' = \vec{F} - \vec{F}_{\text{від}} - \vec{F}_k,$$

або

$$m\vec{a}' = m\vec{a} - m\vec{\omega}^2 R - 2m[\vec{v}, \vec{\omega}]. \quad (4.12)$$

Прискорення \vec{a}' в (4.12) називають відносним прискоренням тіла відносно рухомої системи відліку, $m\vec{a} = \vec{F}$ – рівнодійна всіх сил, що діють на тіло з боку інших тіл, тобто це сила, що реально існує як результат взаємодії тіл.

Дією сил Коріоліса пояснюється ряд явищ, що спостерігаються при русі тіл поблизу земної поверхні. Так, внаслідок добового обертання Землі, тіла, які вертикально падають, відхиляються на схід, а тіла, що рухаються вздовж земної поверхні, відхиляються в північній півкулі вправо, а в південній – вліво від напрямку їх руху. Останнє призводить до підмивання відповідного берега у річок; зношення правої рейки залізничної колії в північній півкулі і лівої – в південній (за ходом потягів); виникненню деяких повітряних і морських течій тощо.

Сили Коріоліса враховуються при розрахунку польотів ракет та артилерійських снарядів на великі відстані.

§ 4.5. Штучна гравітація

В § 3.9 було показано, що якщо тіло рухається (падає) з прискоренням, рівним прискоренню вільного падіння ($\vec{a} = \vec{g}$), то воно перебуває в стані **невагомості**. Це такий стан, коли діючи на тіло зовнішні сили не викликають взаємних тисків частинок тіла одна на одну. Наприклад, в стані невагомості знаходиться космонавт всередині космічного корабля на околоземній орбіті.

Для людини (як і для будь-якого біологічного об'єкта) невагомість незвичне явище. Тривале перебування людини в стані невагомості небажане, оскільки організм людини пристосований до земних умов і до роботи при наявності ваги.

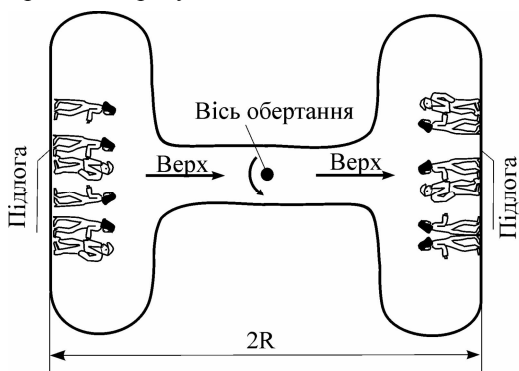


Рис. 4.6

Проблеми, які виникають у космонавтів в стані невагомості, можуть бути розв'язані шляхом створення на космічній станції штучної гравітації. Тоді її мешканці могли б функціонувати в умовах, близьких до нормальних (земних). Для досягнення цього необхідно лише привести станцію в стан обертання.

Нехай космічний корабель, який складається з двох відсіків, з'єднаних переходом довжиною $2R$, обертається з кутовою швидкістю ω , як показано на рис. 4.6. В резуль-

таті кожна точка підлоги корабля рухається з доцентровим прискоренням

$$a_{\text{доц}} = \omega^2 R. \quad (4.12)$$

На космонавта, який знаходиться на космічному кораблі, діє відцентрова сила інерції

$$F_i = m\omega^2 R, \quad (4.13)$$

з якою космонавт діє на підлогу корабля. З точки зору космонавта корабель знаходиться в стані спокою і згідно третього закону Ньютона підлога корабля діє на космонавта з силою реакції, яка є доцентровою силою

$$F_{\text{доц}} = -m\omega^2 R. \quad (4.14)$$

Це така ж ситуація, яка б мала місце, коли б на космонавта діяла сила тяжіння. Таким чином, “вага” космонавта $P = m\omega^2 R$. В результаті напрямок до центра космічного корабля космонавт відчуває як “верх”, а протилежний напрямок – як “низ”.

Приклад 4.2. Припустимо, що космічний корабель, зображений на рис. 4.6, має радіус $R = 20$ м. Скільки обертів за секунду повинен здійснювати такий корабель для підтримання у космонавтів нормальної ваги.

Розв'язок. В цьому випадку

$$a_{\text{доц}} = g = 9,8 \text{ м/с}^2.$$

Тоді, згідно (4.12)

$$\omega^2 R = g.$$

Якщо врахувати, що $\omega = 2\pi n$, де n – кількість обертів за одиницю часу, то

$$4\pi^2 n^2 R = g,$$

звідки

$$n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{R}} = \frac{1}{2(3,14)} \sqrt{\frac{9,8 \text{ м/с}^2}{20 \text{ м}}} = 0,11 \frac{\text{об}}{\text{с}}.$$

§ 4.6. Вплив руху з великим прискоренням на живі організми

Якщо людина знаходиться в кабіні ліфта, який рухається з прискоренням a вгору, то на людину буде діяти сила реакції опори N , яка за абсолютною величиною дорівнює

$$N = m(g + a),$$

(див. § 3.9). Тут mg – сила тяжіння. Таким чином, сила реакції більша сили тяжіння і виникають перевантаження. Якщо $a = g$, то $N = 2mg$, тобто виникає двократне перевантаження. Часто перевантаження вимірюють в одиницях g . Тому при $a = g$ перевантаження дорівнює $n = 2g$.

Перевантаження виникають в кабіні ліфта при його гальмуванні, рухаючись вниз або в кабіні космічного корабля при посадці на Землю.

Великі перевантаження діють на людину в космічних ракетах, які стартують з великими прискореннями, а також при криволінійному русі за рахунок відцентрових сил інерції, наприклад, при виконанні військовим літаком “мертвої петлі”.

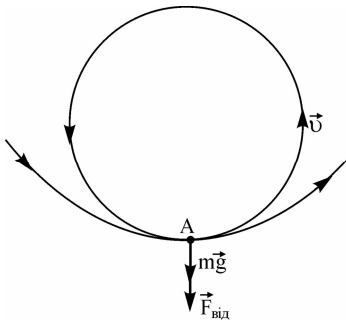


Рис. 4.7

Приклад 4.3. Яке перевантаження діє на пілота військового літака в нижній точці “мертвої петлі” (точці A (рис. 4.7)). Радіус петлі $R = 500 \text{ м}$, лінійна швидкість літака $v = 700 \text{ км/год}$.

Розв’язок. Сила, з якою крісло тисне на пілота в точці A, визначається формулою (4.9):

$$N = m \left(g + \frac{v^2}{R} \right) = mg \left(1 + \frac{v^2}{Rg} \right),$$

де v^2/R – відцентрове прискорення, mg – сила тяжіння, яка діє на пілота. Тоді

$$N = mg \left[1 + \frac{(194,4 \text{ м/с})^2}{(500 \text{ м})(9,8 \text{ м/с}^2)} \right] = 8,7 mg.$$

Висновок: В точці A пілот відчуває ~ 9 – кратне перевантаження ($n \approx 9g$).

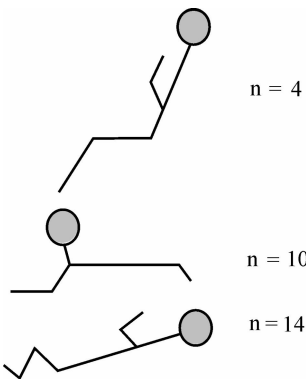


Рис. 4.8

Перевантаження можуть істотно впливати на організм людини, оскільки при цьому змінюється взаємний тиск внутрішніх органів одних на інші, виникає їх деформація, змінюється циркуляція крові в організмі людини. Так, щоб забезпечити циркуляцію крові, коли людина знаходиться в нормальному стані (наприклад, стоїть нерухомо), серце прокачує m кілограмів крові вгору (до мозку) з силою $F = m \cdot 9,8 \text{ Н}$. При виникненні великого перевантаження (наприклад, при зльоті ракети з космонавтом), серце космонавта може виявитися не здатним забезпечити перекачку крові до мозку, і він може знепритомніти.

На рис. 4.8 схематично показані положення тіла людини і наведені відповідні значення перевантажень, які може на протязі, по крайній мірі кількох хвилин, перенести здорова людина без серйозних порушень в організмі.

Крім того, з метою підготовки перенесення великих перевантажень майбутніх пілотів і космонавтів тренують на спеціальних пристроях (центрифугах).

§ 4.7. Центрифуга

Особливості динаміки руху по колу використовують в пристроях, призначених для швидкого розділення і дослідження речовин, які мало відрізняються за своїми фізичними властивостями. Такі пристрої називають **центрифугами**. Основною частиною центрифуги є ротор, до якого прикріплено певну кількість збалансованих пробірок на певній відстані від осі обертання (рис. 4.9). Ротор обертається з великою швидкістю – від кількох тисяч до десятків тисяч (в ультрацентрифугах) обертів за хвилину.

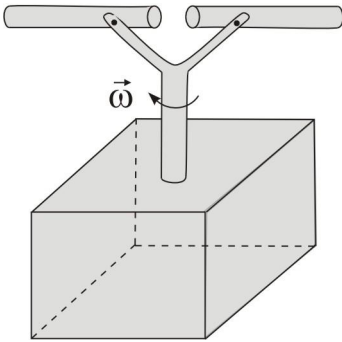


Рис. 4.9

Якщо в пробірці, наповненій рідиною, знаходиться частинка досліджуваної речовини, то при обертанні ротора центрифуги на частинку в горизонтальному напрямку будуть діяти дві сили: **доцентрова**, яка є силою опору рідини, і **відцентрова сила інерції**. Коли доцентрова сила (сила опору рідини) більша за відцентрову силу інерції, то частинка буде переміщатися до осі обертання. Це має місце тоді, коли густина частинки ρ_1 менша густини рідини ρ ($\rho_1 < \rho$). Саме так відділяється масло від молока в молочному сепараторі.

Якщо відцентрова сила інерції є більшою доцентрової сили (що можливо за виконання умови $\rho_1 > \rho$), то частинка переміщатиметься до периферії і в кінцевому рахунку досягне дна пробірки, яке на неї буде діяти з силою, необхідною, щоб втриматися на колі (з доцентровою силою).

В центрифугах розділяють і осаджують ті речовини, які не можна розділити або осадити під дією сили тяжіння. Завдяки високим швидкостям обертання центрифуга створює “**ефективну силу тяжіння**”, яка значно перевищує звичайну силу тяжіння. Під дією цієї сили частинки рухаються до дна пробірки набагато швидше, ніж в звичайних умовах.

Центрифуги широко використовуються в біології для розділення різних суспензій і навіть для осадження крупних білкових молекул. В медико-біологічних дослідженнях за допомогою сучасних ультрацентрифуг розділяють біополімери, віруси і субклітинні частинки.

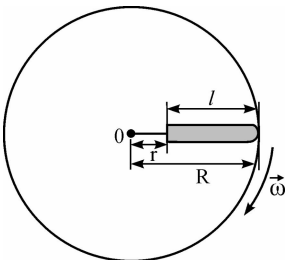


Рис. 4.10

Приклад 4.4. Частота обертання ротора ультрацентрифуги $n = 50\,000$ об/хв. Довжина пробірки (перпендикулярної до осі обертання) дорівнює $l = 0,06$ м, а дно пробірки знаходиться від осі обертання на відстані $R = 0,10$ м (рис. 4.10). а) Розрахувати відцентрове прискорення (в одиницях прискорення вільного падіння g). б) Якщо повна маса речовини, що міститься в пробірці дорівнює $m = 12$ г, то яку силу повинно витримувати дно пробірки?

Розв’язок. а) Відцентрове прискорення інерції частинки у верхній частині пробірки

$$a_1 = \frac{v^2}{r},$$

де $r = R - l$ – відстань від осі обертання до верхньої частини пробірки, v – лінійна швидкість частинки на відстані r від осі обертання, яка дорівнює

$$v = \frac{(2\pi r)n}{t} = \frac{2\pi(R-l)n}{t},$$

де $2\pi r$ – довжина кола, по якому обертається частинка у верхній частині пробірки. Тоді

$$a_1 = \frac{4\pi^2(R-l)n^2}{t^2} = \frac{4(3,14)^2(0,04 \text{ м})(5,0 \cdot 10^4 \text{ об/хв})^2}{(60,0 \text{ с/хв})^2} = 10,9 \cdot 10^5 \text{ м/с}^2.$$

Розділивши це значення на $g = 9,8 \text{ м/с}^2$, отримаємо прискорення $a_1 = 1,1 \cdot 10^5 g$ (в одиницях g).

Частинка біля дна пробірки обертається з прискоренням

$$a_2 = \frac{4\pi^2 R n^2}{t^2} = \frac{4(3,14)^2(0,10 \text{ м})(5 \cdot 10^4 \text{ об/хв})^2}{(60 \text{ с/хв})^2} = 2,74 \cdot 10^6 \text{ м/с}^2,$$

або

$$a_2 = \frac{2,74 \cdot 10^6 \text{ м/с}^2}{9,8 \text{ м/с}^2} = 2,79 \cdot 10^5 g \text{ (в одиницях } g \text{)}.$$

б) Речовина, що міститься в пробірці, буде діяти на дно пробірки з силою

$$F = m a_c,$$

де $a_c = \frac{a_1 + a_2}{2}$ – середнє прискорення частинок, що знаходяться в пробірці. Тоді

$$F = \frac{m(a_1 + a_2)}{2} = \frac{(0,0120 \text{ кг})(1,10 \cdot 10^6 \text{ м/с}^2 + 2,74 \cdot 10^6 \text{ м/с}^2)}{2} = 2,30 \cdot 10^4 \text{ Н}.$$

Ця сила еквівалентна силі тяжіння, яка діє на тіло масою $m = 2351 \text{ кг}$ ($m = F / g = (2,30 \cdot 10^4 \text{ Н}) / (9,8 \text{ м/с}^2) = 2,351 \cdot 10^3 \text{ кг}$, тобто приблизно 2,5 тонни).