

4. ВЛАСТИВОСТІ РІДИН

- Рідини зберігають об'єм, але не зберігають форму (набувають форму посудини, в яку їх вміщують).
- Основна властивість рідини — плинність.

Характер молекулярного руху: молекули коливаються відносно положення рівноваги і «перестрибують» в інші позиції (рис. 161). Час «осідлого» життя більший за час переміщень. Молекули розташовані на порівняно невеликих відстанях, тому властивості рідини зумовлюються силами взаємодії молекул.



Рис. 161

Під дією сил поверхневого натягу рідина в стані невагомості чи в малій кількості (крапля) набуває форму кулі, оскільки при цьому є мінімальною площа вільної поверхні, а значить, і поверхневої енергії — адже всяка система прагне до стану з мінімальною потенціальною енергією.

4.1. Особливості поверхневого шару рідини

Найбільш характерною властивістю рідкого стану є наявність різкої межі, яка розділяє рідину і її пару.

Молекули рідини, що знаходяться на її поверхні, притягуються молекулами, які

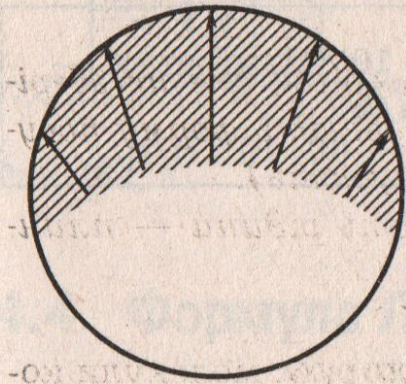
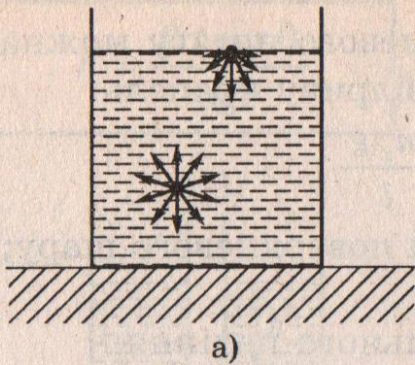


Рис. 162, а, б

є всередині рідини. Притягання молекул пари, які знаходяться над поверхнею, є мізерно малим. Під впливом рівнодіючої сили притягання молекули поверхневого шару втягуються всередину рідини, число молекул на поверхні зменшується і площа поверхні скорочується. На поверхні залишається така кількість молекул, при якій її площа виявляється мінімальною для даного об'єму рідини (рис. 162, а).

Сила поверхневого натягу — це сила, яка діє на межі стикання рідини з твердим тілом перпендикулярно межі по дотичній до поверхні рідини (рис. 162, б).

4.2. Поверхнева енергія. Поверхневий натяг

$$\sigma = \frac{F_{\text{н}}}{l_{\text{межі}}}$$

Поверхневим натягом називається величина, вимірювана відношенням модуля сили поверхневого натягу до довжини межі поверхні плівки:

$$\sigma = \frac{F_{\text{н}}}{l_{\text{межі}}}$$

У СІ поверхневий натяг виражається в ньютонах на метр: $[\sigma] = \text{Н/м}$.

Величина поверхневого натягу залежить від виду рідини і її температури.

Енергія поверхневого шару рідини площею S :

$$\Pi = \sigma \cdot S$$

$$\Pi = \sigma \cdot S.$$

Робота при зміні площі поверхневого шару плівки

$$A = \sigma \Delta S = \Delta \Pi$$

$$A = \sigma \Delta S = \Delta \Pi.$$

Величину поверхневого натягу можна визначити методом відриву крапель:

$$\sigma = \frac{m_k g}{l},$$

де l — довжина межі поверхневого шару;
 m_k — маса краплі;
 g — прискорення вільного падіння.

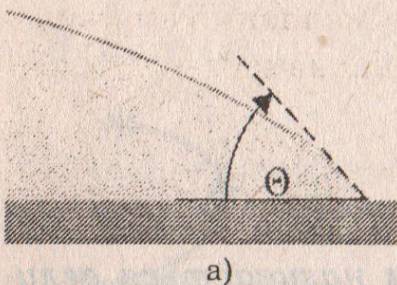
Цікаві факти

Поверхневий натяг при 20 °С: води — $7,2 \cdot 10^{-2}$ Н/м; ртуті — $47 \cdot 10^{-2}$ Н/м; мильного розчину — $\approx 4 \cdot 10^{-2}$ Н/м.

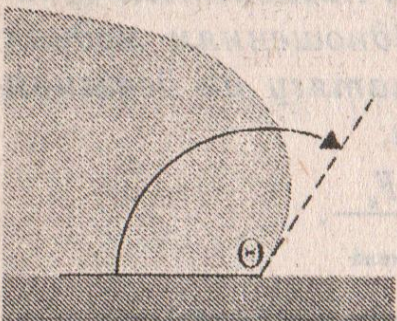
Поверхневий натяг крові людини при 36,7 °С — $60 \cdot 10^{-2}$ Н/м.

4.3. Явище змочування.

Капілярні явища



а)



б)

Рис. 163, а, б

Рідина, яка розтікається по твердому тілі, називається **змочуючою** дане тверде тіло (вода по склу і т. п.). При цьому рівнодіюча сил притягання молекул на межі зіткнення з молекулами рідини менша, ніж з молекулами твердого тіла (рис. 163, а).

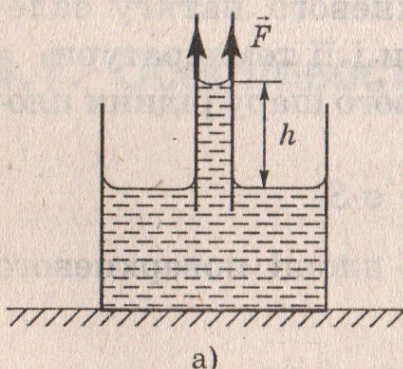
Рідина, котра не розтікається, а стягується міжмолекулярними силами в краплі, називається **незмочуючою** дане тверде тіло (вода на жирній поверхні і т. п.). Рівнодіюча сила притягання молекул на межі зіткнення з молекулами рідини більша, ніж з молекулами твердого тіла (рис. 163, б).

θ — крайовий кут.

При повному змочуванні $\theta = 0$.

При повному незмочуванні $\theta = \pi$.

Змочування — це трифазне явище, оскільки воно відбувається на межі трьох фаз: твердої, рідкої і газоподібної.



а)

Рис. 164, а

У тонкій трубці — капілярі — у разі змочування рідина піднімається по стінці, утворюється увігнута поверхня рідини (увігнутий меніск) (рис. 164, а).

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho g r}$$

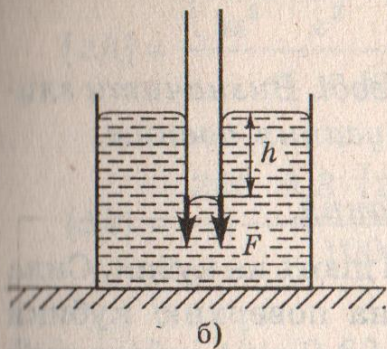


Рис. 164, б

Висота підйому рідини в трубці:

$$h = \frac{2\sigma \cos \theta}{\rho g r},$$

де σ — поверхневий натяг;
 r — радіус трубки;
 ρ — густина рідини.

Незмочуюча рідина опускається в капілярі на h , меніск при цьому опуклий (рис. 164, б).

4.4. Формула Лапласа

$$\Delta p = \pm \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

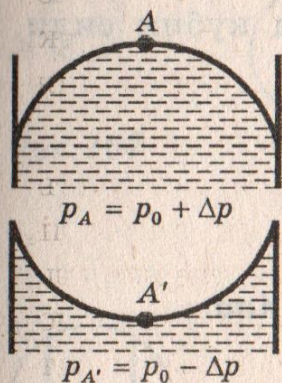


Рис. 165

Формула Лапласа.

Додатковий тиск, зумовлений кривизною поверхні рідини, визначається так:

$$\Delta p = \pm \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right),$$

де R_1 і R_2 — радіуси кривизни двох взаємно перпендикулярних перетинів поверхні рідини; знак «+» — для опуклого меніска, «-» — для ввігнутого.

Тиск у точках A і A' вказаний на рис. 165:

p_0 — тиск на вільну поверхню.

Якщо $R_1 = R_2 = R$ (сферична поверхня), то

$$\Delta p = \frac{2\sigma}{R}.$$

$$\Delta p = \frac{2\sigma}{R}$$

$$\Delta p = 2 \cdot \frac{2\sigma}{R} = \frac{4\sigma}{R}$$

Для тонкостінної порожньої сфери (бульбашки), що має дві поверхні — зовнішню і внутрішню, лапласів тиск дорівнює

$$\Delta p = 2 \cdot \frac{2\sigma}{R} = \frac{4\sigma}{R}.$$

4.5. Приклади розв'язування задач

Задача 1.

Пробковий кубик із ребром 2 см плаває у воді. Визначити глибину його занурення у воду, вважаючи змочування повним.

Дано:

$$\rho_{\text{пр}} = 240 \text{ кг/м}^3$$

$$\sigma_{\text{в}} = 7,2 \cdot 10^{-2} \text{ Н/м}$$

$$\rho_{\text{рід}} = 1000 \text{ кг/м}^3$$

$$\theta = 0$$

$$a = 2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$$

$$\Delta h = ?$$

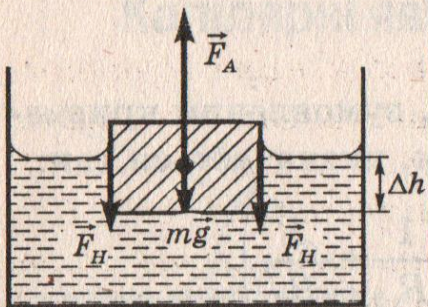


Рис. 166

Розв'язання:

Розглянемо сили, які діють на кубик. Сила натягу піднімає воду на поверхню кубика (змочування), діючи на нього вертикально вниз. Сила тяжіння напрямлена вниз, а архімедова сила — вгору. Оскільки кубик перебуває в рівновазі, то геометрична сума сил, діючих на кубик, дорівнює нулю (рис. 166):

$$\vec{F}_A + m\vec{g} + \vec{F}_H = 0.$$

У проекції на Ox :

$$F_A - F_H - mg = 0. \quad (1)$$

Розпишемо діючі на кубик сили.

Сила Архімеда:

$$F_A = \rho_{\text{рід}} g \Delta h \cdot a^2.$$

Сила поверхневого натягу:

$$F_H = \sigma l,$$

де l — периметр куба. Оскільки $l = 4a$, то $F_H = 4\sigma a$.

Розпишемо силу тяжіння кубика:

$$mg = \rho_{\text{пр}} g a^3.$$

Підставимо значення сил у рівняння (1):

$$\rho_{\text{рід}} g \Delta h \cdot a^2 - 4\sigma a - \rho_{\text{пр}} g a^3 = 0.$$

Виразимо шукану глибину занурення кубика в рідину Δh :

$$\Delta h = \frac{\rho_{\text{пр}} g a^3 + 4\sigma a}{\rho_{\text{рід}} g a^2}. \quad (2)$$

Скорочуючи на a чисельник і знаменник виразу (2), дістанемо:

$$\Delta h = \frac{\rho_{\text{пр}} g a^2 + 4\sigma}{\rho_{\text{рід}} g a}.$$

Обчислення:

$$[\Delta h] = \frac{\left(\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot \text{м}^2 + \frac{\text{Н}}{\text{м}} \right) \cdot \text{м}^3 \cdot \text{с}^2}{\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{м}} = \text{м},$$

$$\{\Delta h\} = \frac{240 \cdot 9,8 \cdot (2 \cdot 10^{-2})^2 + 4 \cdot 7,2 \cdot 10^{-2}}{1000 \cdot 9,8 \cdot 2 \cdot 10^{-2}} \approx 6,2 \cdot 10^{-3}.$$

Відповідь: $\Delta h = 0,62$ см.

Задача 2.

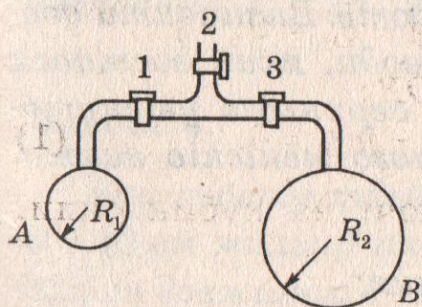


Рис. 167

На протилежних кінцях трубки-трійника видули дві мильні бульбашки А і В різних діаметрів, після чого вихідний отвір трубки закрили (рис. 167). Що станеться з бульбашками, якщо залишити їх самих, захистивши від зовнішніх впливів (відкрити крани 1 і 3)?

Аналіз і розв'язання:

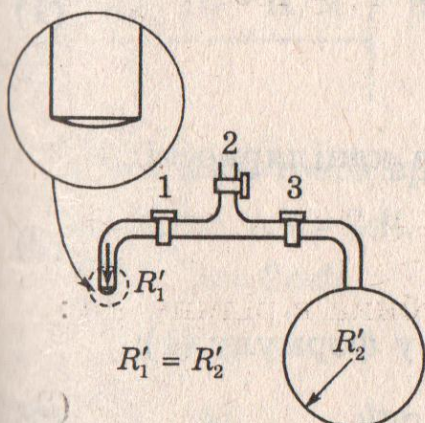


Рис. 168

Об'єм бульбашки А зменшуватиметься, а об'єм бульбашки В — збільшуватиметься, оскільки лапласовий тиск $p_1 = \frac{4\sigma}{R_1}$ більший від лапласового тиску $p_2 = \frac{4\sigma}{R_2}$ (більшому радіусу відповідає менший лапласовий тиск).

Рівновага настане, коли тиск всередині бульбашок (лапласові тиски) зрівняється, тобто коли поверхні обох плівок (радіус кульового сегмента першої плівки R'_1 і радіус кулі другої плівки R'_2) будуть мати однакову кривизну: $R'_1 = R'_2$ (рис. 168).

Задача 3.

Під час посухи на поверхні землі утворюється тверда кора. Чи треба зберігати її, щоб запобігти висиханню нижніх шарів землі?

Аналіз і розв'язання:

Ні, ґрунт слід розрихлювати, щоб перешкодити підйому ґрунтової води по капілярах, які утворюються у верхніх затверділих шарах ґрунту.

Задача 4.

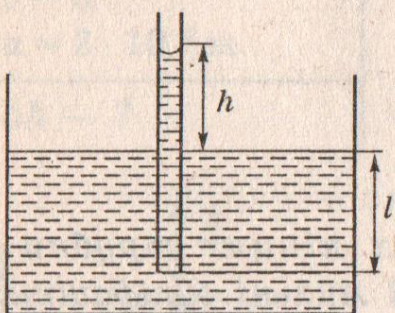


Рис. 169

У капілярній трубці, зануреній вертикально в воду на глибину l , вода піднялась на висоту h (рис. 169). Трубку закривають знизу пальцем, виймають із води і знову відкривають. Визначити довжину x стовпчика води, який зостався в трубці. Кривизну верхнього увігнутого і нижнього опуклого менісків вважають однаковою.

Дано:

капіляр

l

h

$$\rho_{\text{рід}} = 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

змочування

x — ?

Розв'язання:

Оскільки скляна трубка є капіляром, то з'являється надлишковий лапласовий тиск, зумовлений кривизною меніску:

$$p_1 = \frac{2\sigma}{R}, \quad (1)$$

де R — радіус капіляра.

Для визначення R використовуємо закон капілярності:

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g R}. \quad (2)$$

Виразимо R із формули (2) і підставимо у формулу (1):

$$R = \frac{2\sigma}{\rho g h} \Rightarrow p_1 = \frac{2\sigma}{2\sigma} \rho g h = \rho g h. \quad (3)$$

Лапласів тиск дорівнює гідростатичному тиску стовпчика рідини висотою h . Коли трубку виймаємо з води, утворюється два меніски. Лапласів тиск збільшується, а значить збільшується висота стовпчика води в капілярі. Визначимо цю висоту. Коли

трубку відкриваємо, вода з капіляра виливається доти, поки внизу не утвориться опуклий меніск. Лапласів тиск напрямлений вгору і дорівнює:

$$P_{л1} = P_{л11} + P_{л12};$$

а) якщо $l > h$, то (рис. 170, а)

$$p_{л1} = 2p_{л1} = \rho g x_1,$$

$$2\rho g h = \rho g x_1,$$

$$x_1 = 2h;$$

б) якщо $l < h$, то (рис. 170, б)

$$p_{л11} + p_{л12} = \rho g x_2,$$

$$\rho g h + \rho g l = \rho g x_2,$$

$$x_2 = l + h.$$

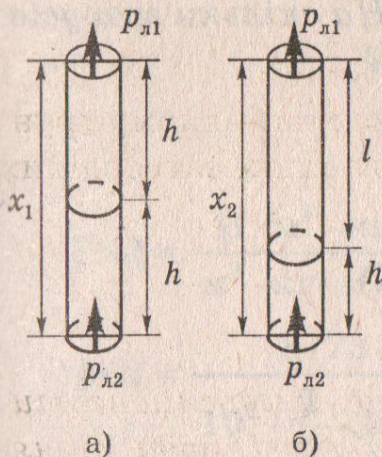


Рис. 170, а, б

Відповідь: $x_1 = 2h$, якщо $l > h$; $x_2 = l + h$, якщо $l < h$.

Задача 5.

Яку роботу треба здійснити, щоб розтягнути на відстань $d = 10$ см мильну плівку на дротяній рамці з рухомою перекладиною довжиною $l = 5$ см?

Дано:

$$d = 10 \text{ см}$$

$$l = 5 \text{ см}$$

$$\sigma = 40 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$$

$A = ?$

СІ:

$$d = 0,1 \text{ м}$$

$$l = 0,05 \text{ м}$$

$$\sigma = 40 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$$

Розв'язання:

Робота A дорівнює збільшенню енергії вільної поверхні рідини:

$$A = \sigma \Delta S.$$

Оскільки треба враховувати збільшення поверхні з обох боків плівки, то $\Delta S = 2dl$.

$$\text{Тоді } A = 2\sigma dl.$$

Обчислення:

$$[A] = \frac{\text{Н}}{\text{м}} \cdot \text{м} \cdot \text{м} = \text{Н} \cdot \text{м} = \text{Дж},$$

$$\{A\} = 2 \cdot 40 \cdot 10^{-3} \cdot 0,1 \cdot 5 \cdot 10^{-2} = 4 \cdot 10^{-4}.$$

Відповідь: $A = 400$ мкДж.

Задача 6.

Яка кількість теплоти виділиться в навколишнє середовище, якщо при злитті крапельок діаметром 1 мкм вийде 1 кг чистої води при тій же самій температурі? На скільки градусів нагрілась би вода, якби не було тепловіддачі?

Дано:

$$m = 1 \text{ кг}$$

$$\rho_{\text{в}} = 10^3 \text{ кг/м}^3$$

$$c_{\text{в}} = 4200 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$$

$$d = 1 \text{ мкм}$$

$$\sigma = 73 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$$

$$\Delta t = ?$$

Сі:

$$m = 1 \text{ кг}$$

$$\rho_{\text{в}} = 10^3 \text{ кг/м}^3$$

$$c_{\text{в}} = 4200 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$$

$$d = 10^{-6} \text{ м}$$

$$\sigma = 73 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$$

Розв'язування:

Краплі, порівняно з водою, яка міститься в одній посудині, мають значно більшу поверхневу енергію. Ця надлишкова енергія

$$\Pi = \sigma_{\text{в}} \Delta S. \quad (1)$$

Визначимо ΔS :

$$\Delta S = Sn,$$

де S — поверхня однієї краплі;

n — кількість крапель.

$$S = 4\pi R^2, \quad n = \frac{V}{V_1},$$

де V і V_1 — відповідно об'єм 1 кг води і краплі.

Підставимо значення ΔS у формулу (1):

$$\Pi = 4\pi R^2 \frac{V}{V_1} \sigma_{\text{в}}.$$

Визначимо V і V_1

$$V = \frac{m}{\rho_{\text{в}}}; \quad V_1 = \frac{4}{3} \pi R^3,$$

тоді

$$\Pi = \frac{4\pi R^2 m \sigma_{\text{в}}}{\rho_{\text{в}} \frac{4}{3} \pi R^3} = \frac{3m \sigma_{\text{в}}}{\rho_{\text{в}} R}.$$

Розрахуємо, наскільки підвищилася б температура води, якби не було теплообміну з навколишнім середовищем.

$$Q = c_b m \Delta t \Rightarrow \Delta t = \frac{Q}{c_b m}.$$

Згідно із законом збереження енергії $Q = \Pi$, тоді

$$\Delta t = \frac{3m\sigma_b}{\rho_b R c_b m} = \frac{3\sigma_b}{\rho_b R c_b}.$$

Обчислення:

$$[\Delta t] = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{кг} \cdot \text{К}}{\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{Дж}} = \text{К},$$

$$\{\Delta t\} = \frac{3 \cdot 73 \cdot 10^{-3}}{10^3 \cdot \frac{1}{2} \cdot 10^{-6} \cdot 4200} = 0,1.$$

Відповідь: $\Delta t = 0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$, $\Delta T = 0,1 \text{ К}$.

Задача 7.

Яку роботу проти сил поверхневого натягу треба виконати, щоб видути мильну бульбашку радіусом R ? Чому дорівнює надлишковий тиск усередині бульбашки?

Розв'язування:

Мильна бульбашка являє собою дуже тонку плівку мильної води приблизно сферичної форми. Ця плівка має дві поверхні — зовнішню і внутрішню. Нехтуючи товщиною плівки і вважаючи тому радіуси обох сфер однаковими, знайдемо їх спільну площу:

$$S = 4\pi R^2 + 4\pi R^2 = 8\pi R^2. \quad (1)$$

Збільшення поверхневої енергії пов'язане зі збільшенням ΔS :

$$\Delta \Pi = \sigma \Delta S. \quad (2)$$

Виконана під час видування бульбашки робота проти сил поверхневого натягу іде на збільшення поверхневої енергії на $\Delta \Pi$. Таким чином, із (1) і (2) дістанемо:

$$A = \Delta \Pi = 8\pi R^2 \sigma.$$

Надлишковий (порівняно із зовнішнім) тиск всередині бульбашки дорівнює:

$$\Delta p = \frac{4\sigma}{R}.$$