



Деякі види павуків можуть пересуватися по поверхні води не провалюючись, наче ця поверхня вкрита невидимою тонкою плівкою. Те саме враження виникає, якщо спостерігати за витіканням води з маленького отвору, — вода тече не тоненьким струменем, а утворює краплі. Паперова серветка вбирає воду, ледь торкнувшись її поверхні. Яка ж сила є причиною всіх цих явищ?

1

Які особливості має поверхневий шар рідини

На вільній поверхні рідини молекули перебувають в особливих умовах, які відрізняються від умов, у яких перебувають молекули всередині рідини. Розглянемо дві молекули — *A* і *B* (рис. 33.1): молекула *A* перебуває всередині рідини, а молекула *B* — на її поверхні. Молекула *A* оточена іншими молекулами рідини рівномірно, тому сили, що діють на молекулу *A* з боку молекул, які потрапляють у сферу міжмолекулярної взаємодії, скомпенсовані, тобто їх рівнодійна дорівнює нулю.

Молекула *B* з одного боку оточена молекулами рідини, а з другого боку — молекулами газу. Оскільки з рідини на неї діє набагато більше молекул, ніж із газу, то рівнодійна \vec{F} міжмолекулярних сил напрямлена вглиб рідини. Щоб молекула з глибини рідини потрапила в поверхневий шар, потрібно виконати роботу проти некомпенсованих міжмолекулярних сил. Це означає, що молекули поверхневого шару рідини (порівняно з молекулами всередині рідини) мають надлишкову потенціальну енергію. Ця надлишкова енергія є складником внутрішньої енергії рідини і називається *поверхневою енергією* ($W_{\text{пов}}$).

Очевидно, що чим більшою є площа *S* поверхні рідини, тим більша поверхнева енергія: $W_{\text{пов}} = \sigma S$, де σ (сигма) — коефіцієнт пропорційності, який називають *поверхневим натягом рідини*.

Поверхневий натяг рідини — фізична величина, яка характеризує дану рідину і дорівнює відношенню поверхневої енергії до площі поверхні рідини:

$$\sigma = \frac{W_{\text{пов}}}{S}$$

Одиниця поверхневого натягу в СІ — ньютон на метр: $[\sigma] = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2} = 1 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{м}^2} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{м}} \left(\frac{\text{Н}}{\text{м}} \right)$.

Поверхневий натяг рідини визначається силами міжмолекулярної взаємодії, тому він залежить:

1) від природи рідини: у летких рідин (ефір, спирт, бензин) поверхневий натяг менший, ніж у нелетких (ртуть, рідкі метали);

2) від температури рідини: чим вища температура рідини, тим меншим є поверхневий натяг рідини;

3) від наявності в складі рідини поверхнево активних речовин; їх наявність значно зменшує поверхневий натяг рідини;

4) від властивостей газу, з яким рідина межує. У таблицях зазвичай наводять значення поверхневого натягу на межі рідини і повітря за певної температури (табл. 1).

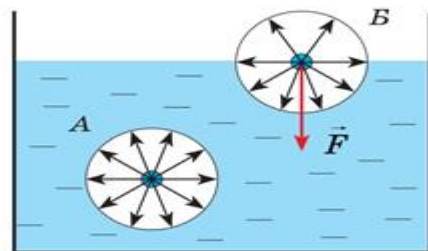


Рис. 33.1. До введення поняття поверхневого натягу рідини

Таблиця 1

Поверхневий натяг σ деяких рідин

Рідина	$t, ^\circ\text{C}$	$\sigma, \frac{\text{Н}}{\text{м}}$
Вода (чиста)	20	0,0728
Розчин мила	20	0,040
Спирт	20	0,0228
Ефір	25	0,0169
Ртуть	20	0,4650
Золото	1130	1,102
Водень	-253	0,0021
Гелій	-269	0,000 12

2

Сила поверхневого натягу

Оскільки поверхневий шар рідини має надлишкову потенціальну енергію ($W_{\text{пов}} = \sigma S$), а будь-яка система прагне до мінімуму потенціальної енергії, то вільна поверхня рідини прагне зменшити свою площу (скоротитися). Тобто вздовж поверхні рідини діють сили, що намагаються стягнути цю поверхню. Ці сили називають *силами поверхневого натягу*.

Наявність сил поверхневого натягу робить поверхню рідини схожою на розтягнуту гумову плівку, однак пружні сили в гумовій плівці залежать від площі її поверхні (тобто від того, наскільки плівка деформована), а *поверхня рідини завжди «натягнута» однаково, тобто сили поверхневого натягу не залежать від площі поверхні рідини*.

Існування сил поверхневого натягу можна експериментально довести за допомогою такого досліду. Якщо дротяний каркас із прив'язаною до

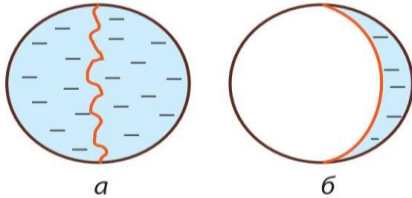


Рис. 33.2. Дослід, що демонструє наявність сил поверхневого натягу

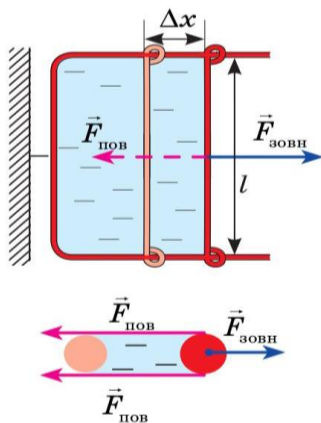


Рис. 33.3. На поперечину діють три сили: зовнішня сила $\vec{F}_{\text{зовн}}$ і дві сили поверхневого натягу ($\vec{F}_{\text{пов}}$), що діють уздовж кожної з двох поверхонь плівки:

$$F_{\text{зовн}} = 2F_{\text{пов}}$$



Рис. 33.4. Монетка утримується на поверхні води завдяки силі поверхневого натягу. (Щоб провести такий дослід, монетку потрібно потерти між пальців і обережно опустити на поверхню води.)

нього ниткою занурити в мильний розчин, каркас затягнеться мильною плівкою, а нитка набере довільної форми (рис. 33.2, а). Якщо ж обережно проткнути голкою мильну плівку з одного боку від нитки, сила поверхневого натягу мильного розчину, яка діє з іншого боку нитки, натягне нитку (рис. 33.2, б).

Опустимо в мильний розчин дротяну рамку, одна зі сторін якої рухома. На рамці утвориться мильна плівка (рис. 33.3). Будемо розтягувати цю плівку, діючи на поперечину (рухома сторона рамки) з певною силою $F_{\text{зовн}}$. Якщо під дією цієї сили поперечина переміститься на Δx , то зовнішні сили виконають роботу:

$$A = F_{\text{зовн}} \Delta x = 2F_{\text{пов}} \Delta x.$$

За рахунок виконання цієї роботи площі обох поверхонь плівки збільшаться, а отже, збільшиться й поверхнева енергія:

$$A = \Delta W_{\text{пов}} = \sigma \Delta S = \sigma \cdot 2l \Delta x,$$

де $\Delta S = 2l \Delta x$ — збільшення площі двох поверхонь мильної плівки. Прирівнявши праві частини одержаних рівностей, маємо: $2F_{\text{пов}} \Delta x = \sigma \cdot 2l \Delta x$, або:

$$F_{\text{пов}} = \sigma \cdot l.$$

Таким чином, *поверхневий натяг σ чисельно дорівнює силі поверхневого натягу $F_{\text{пов}}$, яка діє на одиницю довжини l лінії, що обмежує поверхню:*

$$\sigma = \frac{F_{\text{пов}}}{l}$$

З одним із методів визначення поверхневого натягу рідини (методом крапель) ви ознайомитесь, виконуючи лабораторну роботу № 7.

3

Де виявляється поверхневий натяг

У повсякденному житті ви постійно зустрічаєтесь з проявами сил поверхневого натягу. Так, завдяки йому на поверхні води утримуються легкі предмети (рис. 33.4) і деякі комахи (див. рисунок на початку § 33). Коли ви купаєтесь і пірнаєте у воду з головою, ваше волосся розходиться в усі боки, але щойно виринете з води, як волосся злипається, бо в цьому

випадку площа вільної поверхні води набагато менша, ніж у разі окремого розташування кожного пасма. З цієї ж причини можна побудувати різні фігури з вологого піску: вода, обволікаючи піщинки, притискає їх одну до одної.

Прагненням рідини зменшити площу поверхні пояснюється й той факт, що в умовах невагомості вода набуває форми кулі, — за даного об'єму кулястій формі відповідає найменша площа поверхні. Форми кулі набувають і тонкі мильні плівки (мильні бульбашки). Поверхневим натягом пояснюється утворення піни: бульбашка газу, досягнувши поверхні рідини, утворює над собою тонкий шар рідини; якщо бульбашка мала, то архімедової сили недостатньо, щоб розірвати подвійний поверхневий шар, і бульбашка застрягає поблизу поверхні. Завдяки поверхневому натягу рідина не виливається з маленького отвору тонесеньким струменем, а капає (рис. 33.5), дощ не проливається через тканину парасолі або намету тощо.

? Наведіть інші приклади прояву поверхневого натягу рідин.

4 Чому одні рідини збираються в краплі, а інші розтікаються

Наявність сил поверхневого натягу виявляється у сферичній формі дрібних крапельок роси, у краплях води, що розбігаються по розпеченій плиті, у крапельках ртуті на поверхні скла. Однак у випадку зіткнення з твердим тілом сферична форма краплі здебільшого не зберігається. Форма вільної поверхні рідини залежить від сил взаємодії молекул рідини з молекулами твердого тіла.

Якщо сили взаємодії між молекулами рідини більші, ніж сили взаємодії між молекулами рідини та твердого тіла, рідина не змочує поверхню твердого тіла (рис. 33.6). Наприклад, ртуть не змочує скло, а вода не змочує вкриту сажею поверхню.

Якщо ж крапельку ртуті помістити на цинкову пластинку, то крапелька прагнучиме розтектися по поверхні пластинки; так само поводить себе й крапелька води на склі (рис. 33.7). *Якщо сили взаємодії між молекулами рідини менші від сил взаємодії між молекулами рідини і твердого тіла, рідина змочує поверхню твердого тіла.*

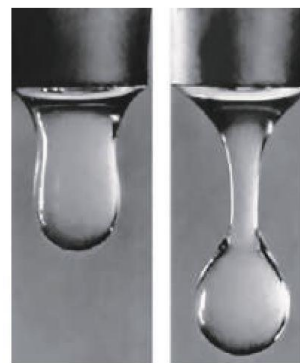


Рис. 33.5. Крапля утримується біля невеликого отвору доти, доки сила поверхневого натягу зрівноважує силу тяжіння

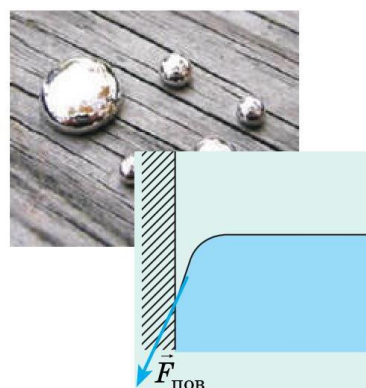


Рис. 33.6. Крапля незмочувальної рідини набуває форми, близької до сферичної, а поверхня рідини поблизу стінки посудини є опуклою

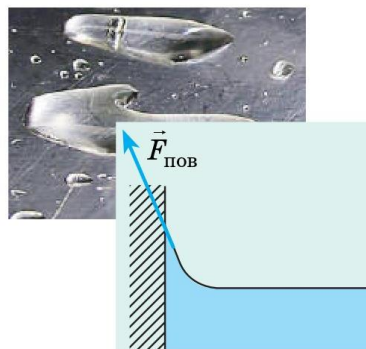


Рис. 33.7. Крапля змочувальної рідини прагне розтектися по поверхні твердого тіла, а поблизу стінки посудини поверхня рідини набуває ввігнутої форми

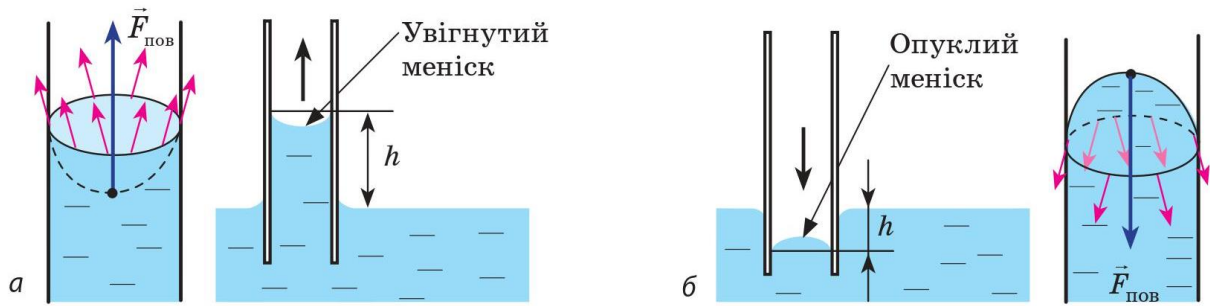


Рис. 33.8. Капілярні явища: *a* — змочувальна рідина піднімається в капілярі; *б* — незмочувальна рідина опускається в капілярі

5 Чому рідина піднімається в капілярах

У природі часто зустрічаються тіла, пронизані численними дрібними капілярами (від латин. *capillaris* — волосяний) — вузькими каналами довільної форми. Таку структуру мають папір, дерево, ґрунт, багато тканин і будівельних матеріалів.

У циліндричних капілярах скривлена поверхня рідини являє собою частину сфери, яку називають *меніском*. У змочувальній рідині утворюється *ввігнутий* меніск (рис. 33.8, *a*), а в незмочувальній — *опуклий* (рис. 33.8, *б*). Поверхня рідини прагне до мінімуму потенціальної енергії, а викривлена поверхня має більшу площу порівняно з площею перерізу капіляра, тому поверхня рідини прагне вирівнятись і під нею виникає *надлишковий (від’ємний або додатний) тиск* — *тиск Лапласа* ($p_{\text{надл}}$).

Під увігнутою поверхнею (рідина змочує капіляр) загальний тиск менший від тиску на поверхню рідини й рідина втягується в капіляр, піднімаючись на досить велику висоту. Так піднімаються волога та поживні речовини в стеблах рослин, гас у ґноті, волога у ґрунтових капілярах. Унаслідок капілярного тиску серветки або тканина вбирають воду, штани в дощову погоду сильно намокають знизу тощо.

Під опуклою поверхнею (рідина не змочує капіляр) тиск більший за зовнішній тиск і рідина в капілярі опускається.

Чим меншим є радіус капіляра, тим більша висота підняття (або опускання) рідини (див. нижче приклад розв’язування задачі).

6 Учимося розв’язувати задачі

Задача. Капілярну трубку радіусом r одним кінцем опустили в рідину, що змочує внутрішню поверхню капіляра. На яку висоту підніметься рідина в капілярі, якщо густина рідини ρ , а її поверхневий натяг σ ? Чому дорівнює тиск Лапласа під увігнутою поверхнею капіляра? Змочування вважайте повним.

<p>Дано: r ρ σ g h — ? $p_{\text{надл}}$ — ?</p>	<p>Аналіз фізичної проблеми. На рідину в капілярі діють сила тяжіння та сила поверхневого натягу ($\vec{F}_{\text{пов}}$) (див. рисунок). У разі повного змочування $\vec{F}_{\text{пов}}$ напрямлена вертикально вгору (по дотичній до поверхні меніска). Підняття рідини в капілярі триватиме доти, доки сила тяжіння піднятого стовпа рідини не зрівноважить силу поверхневого натягу: $mg = F_{\text{пов}}$ (*), де m — маса рідини.</p>	
---	---	--

Пошук математичної моделі, розв'язання

Оскільки $m = \rho V$, а об'єм циліндра $V = \pi r^2 h$, то $m = \rho \pi r^2 h$.

$F_{\text{пов}} = \sigma l$, де $l = 2\pi r$ (довжина кола), отже, $F_{\text{пов}} = \sigma 2\pi r$.

Підставимо вирази для m і $F_{\text{пов}}$ у рівність (*): $\rho \pi r^2 h g = \sigma 2\pi r$, звідки $h = \frac{2\sigma}{\rho g r}$.

Для визначення тиску Лапласа $p_{\text{надл}}$ під поверхнею меніска скористаємося законом Паскаля: в однорідній нерухомій рідині тиск на одному рівні (у нас — на рівні AB) — однаковий, тобто:

$$P_{\text{атм}} + P_{\text{гідр}} + P_{\text{надл}} = P_{\text{атм}} \Rightarrow P_{\text{надл}} = -P_{\text{гідр}} = -\rho g h = -\rho g \cdot \frac{2\sigma}{\rho g r} = -\frac{2\sigma}{r} = -\frac{2\sigma}{R},$$

де R — радіус кривизни меніска (при повному змочуванні $r = R$).

Відповідь: (Ці висновки слід запам'ятати!)

♦ Висота підняття рідини в капілярі прямо пропорційна поверхневому натягу

рідини та обернено пропорційна густині рідини й радіусу капіляра: $h = \frac{2\sigma}{\rho g r}$.

♦ Тиск Лапласа (надлишковий тиск) під сферичною поверхнею рідини прямо пропорційний поверхневому натягу рідини й обернено пропорційний радіусу кривизни

меніска: $p_{\text{надл}} = \pm \frac{2\sigma}{R}$.



Підбиваємо підсумки

- Молекули поверхневого шару рідини мають надлишкову потенціальну енергію порівняно з молекулами, що перебувають усередині рідини; цю енергію називають поверхневою енергією.

- Фізична величина, яка характеризує рідину і дорівнює відношенню поверхневої енергії до площі поверхні рідини, називається поверхневим натягом рідини:

$\sigma = \frac{W_{\text{пов}}}{S}$. Поверхневий натяг також дорівнює силі, яка діє на

одиницю довжини лінії, що обмежує поверхню рідини: $\sigma = \frac{F_{\text{пов}}}{l}$. Одиниця поверхневого натягу в СІ — ньютон на метр (Н/м).

- Під викривленою поверхнею рідини виникає надлишковий (від'ємний або додатний) тиск, який прямо пропорційний поверхневому натягу рідини та обер-

нено пропорційний радіусу кривизни меніска: $p_{\text{надл}} = \pm \frac{2\sigma}{R}$. Завдяки цьому

тиску рідина піднімається в капілярах, які змочує, і опускається в капілярах,

які не змочує. Висота підняття (опускання) рідини в капілярі: $h = \frac{2\sigma}{\rho g r}$.



Контрольні запитання

1. У чому особливості стану молекули поверхневого шару рідини?
2. Що називають поверхневою енергією?
3. Чому рідина прагне набутти форми кулі?
4. Дайте два означення поверхневого натягу рідини.
5. Від яких чинників і чому залежить поверхневий натяг рідини? від яких чинників не залежить?
6. За яких умов рідина змочує поверхню твердого тіла? не змочує?
7. У чому причина тиску Лапласа? Чому він дорівнює?
8. Від яких чинників залежить висота підняття рідини в капілярі?
9. Наведіть приклади капілярних явищ.



Вправа № 33

1. Чому волоски пензлика злипаються після того, як його виймають із води?
2. У капілярі вода піднімається на 0,5 м. Визначте середній діаметр капіляра.
3. Визначте надлишковий тиск усередині мильної бульбашки радіуса 5 см. (Слід пам'ятати, що в мильній бульбашці дві поверхні.)
4. Тонке алюмінієве кільце радіуса 7,8 см і масою 7 г дотикається до мильного розчину. Щоб відірвати кільце від поверхні розчину, потрібно прикласти зусилля 0,11 Н. Визначте поверхневий натяг мильного розчину.
5. Яка кількість енергії вивільняється під час злиття дрібних крапель ртуті радіуса 0,2 мм в одну велику краплю радіуса 2 мм? Площа кулі дорівнює $4\pi r^2$, об'єм кулі — $\frac{4}{3}\pi r^3$.
6. Як ви гадаєте, де на практиці потрібно збільшувати змочування? У яких випадках його варто зменшувати? Скористайтесь додатковими джерелами інформації та дізнайтеся, які речовини використовують для збільшення змочування. Які способи застосовують для зменшення змочування?



Експериментальні завдання

Покладіть сірник на поверхню води. З одного боку сірника обережно додайте краплю мильного розчину. Поясніть подальшу поведінку сірника. Визначте модуль і напрямок сили, яка діятиме на сірник.