

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний аграрний університет
ім. В.В. Докучаєва

М.Я. Рохманов, С.С. Авотін

ФІЗИКА З ОСНОВАМИ БІОФІЗИКИ

Навчальний посібник

За загальною редакцією С.С. Авотіна

Харків – 2020

УДК 53(075.8)

Р 11

*Рекомендовано до видання вченою радою
ХНАУ ім. В.В. Докучаєва
(протокол № 7 від 19 червня 2019 р.)*

Рецензенти: доктори фіз.-мат. наук, професори **А.І. Козарь** (ХНУРЕ),
М.А. Петченко (ХНУМГ);
д-р біол. наук, професор **М.О. Горін** (ХНАУ)

Рохманов М.Я.

Р11 Фізика з основами біофізики: навч. посіб. / М.Я. Рохманов,
С.С. Авотін; за заг. ред. С.С. Авотіна; Харків. нац. аграр. ун-т. – Харків,
2020. – 291 с.

Посібник містить відомості за розділами: біотичні та абіотичні фактори агроценозу, механіка, молекулярна фізика і термодинаміка, електрика та магнетизм, геометрична та хвильова оптика, атомна та ядерна фізика. Складено згідно з навчальною програмою.

Призначено здобувачів спеціальності «Агрономія» вищих аграрних навчальних закладів III і IV рівнів акредитації.

УДК 53(075.8)

- © Харківський національний аграрний університет ім. В.В. Докучаєва, 2020
- © Рохманов М.Я., Авотін С.С., 2020
- © Обкладинка Авотіна С.С., 2020

Зміст

<i>Вступ</i>	8
1. Біотичні та абіотичні фактори агроценозу	12
1.1. Біосфера та її основні компоненти	12
1.2. Біоценоз та агроценоз	14
1.3. Біотичні, абіотичні та антропогенні фактори	15
2. Кінематика та динаміка матеріальної точки і тіла	17
2.1. Кінематика поступального руху	17
2.2. Кінематика обертального руху	20
2.3. Повне прискорення при криволінійному русі	22
2.4. Закони динаміки матеріальної точки	23
2.5. Імпульс. Закон збереження імпульсу	24
2.6. Центр мас (центр інерції) механічної системи	24
2.7. Робота й енергія. Потужність	25
2.8. Силowe потенціальне поле. Потенціал	27
2.9. Сили в механіці	30
2.10. Пружні властивості рослин	33
3. Динаміка обертального руху твердого тіла	36
3.1. Момент сили	36
3.2. Момент інерції	37
3.3. Момент імпульсу	38
3.4. Робота і кінетична енергія при обертальному русі	39
3.5. Основний закон динаміки обертального руху	40
3.6. Вільні осі обертання. Гіроскопи	41
3.7. Статика твердого тіла	41
4. Коливання і хвилі	42
4.1. Коливальний рух. Гармонічні коливання	42
4.2. Пружний, математичний і фізичний маятники	44
4.3. Додавання гармонійних коливань	47
4.4. Згасаючі та вимушені коливання. Резонанс	48
4.5. Механічні хвилі в пружному середовищі	50
4.6. Коливальні процеси в природі	53
4.7. Звук та його характеристики	55
4.8. Ефект Доплера	57
4.9. Ультразвук та інфразвук	57
4.10. Фізичні механізми акусторецепції	59
4.11. Акустичні фактори довкілля	62
5. Механічні фактори навколишнього середовища	64
5.1. Тиск. Атмосферний тиск	64

5.2. Вітер. Рух повітряних потоків	66
5.3. Вплив вібрацій на живі організми. Землетруси	69
5.4. Аеротаксис комах. Феромони	71
5.5. Фізичні механізми механорецепції	72
5.6. Механіка рідинних і газових потоків	74
5.7. Потік рідини. Рівняння нерозривності	74
5.8. Тиск у рідині та газі. Рівняння Бернуллі	76
6. Основи молекулярної фізики	79
6.1. Основні положення молекулярно-кінетичної теорії речовини	79
6.2. Ідеальний газ. Основне рівняння МКТ ідеального газу	80
6.3. Ізопроцеси в газах	83
6.4. Рівняння Менделєєва-Клапейрона	84
6.5. Закон Дальтона	85
6.6. Вологість повітря	85
6.7. Органи відчуття. Нюх і смак	86
7. Класична статистика. Явища перенесення	88
7.1. Швидкості молекул газу. Розподіл Максвелла	88
7.2. Барометрична формула. Розподіл Больцмана	90
7.3. Середня довжина вільного пробігу молекул газу	92
7.4. Явища перенесення	93
7.4.1. Теплопровідність. Закон Фур'є	93
7.4.2. В'язке тертя. Закон Ньютона	93
7.4.3. Дифузія. Закон Фіка. Осмос	94
8. Реальні гази. Властивості рідини і твердого тіла	98
8.1. Реальні гази. Рівняння Ван-дер-Ваальса	98
8.2. Властивості рідини	97
8.2.1. Структура і властивості води	99
8.2.2. Поверхневий натяг. Капілярні явища	101
8.3. Твердий стан речовини	105
8.4. Рідкі кристали	109
9. Основи термодинаміки	111
9.1 Перший закон термодинаміки	111
9.2. Фазові перетворення. Діаграма стану системи	117
9.3. Адіабатичний процес. Рівняння Пуассона	120
9.4. Ефект Джоуля-Томсона. Зрідження газів	121
9.5. Теплова машина. Другий закон термодинаміки	125
9.7. Живі організми як відкриті нерівноважні системи	128
9.9. Фізичні механізми терморецепції	130

10. Фізичні властивості ґрунту	132
10.1. Механічні властивості ґрунту	132
10.2. Механічний склад ґрунту	132
10.3. Структура та фізико-механічні властивості ґрунту	133
10.4. Тепловий режим ґрунту	134
10.5. Теплове забруднення води	135
10.6. Вимірювання температури	136
11. Електростатика	139
11.1. Електричний заряд. Закон Кулона	139
11.2. Електричне поле. Напруженість	142
11.3. Провідники і діелектрики в електричному полі	145
11.4. Робота сил електричного поля. Потенціал	147
11.5. Біопотенціали рослин	149
11.6. Електроємність. Конденсатори	150
12. Електродинаміка	154
12.1. Постійний електричний струм. Джерела струму	154
12.2. Сполука провідників і джерел струму	159
12.3. Розгалужені кола. Правила Кірхгофа	162
12.4. Робота і потужність постійного струму	163
12.5. Термоелектронні явища	165
12.6. Електричний струм в електролітах	167
12.7. Мембранний струм	169
12.8. Електричний струм у газах	170
12.9. Вплив електричного поля на рослини	172
13. Магнітне поле. Електромагнітна індукція	175
13.1. Взаємодія провідників зі струмом, магнітне поле	175
13.2. Сила Ампера. Вектор магнітної індукції	177
13.3. Рамка зі струмом у магнітному полі	179
13.4. Закон Біо-Савара-Лапласа	180
13.5. Магнітний потік. Сила Лоренца. Поле в речовині	183
13.6. Магнітне поле біологічних об'єктів	189
13.7. Явище електромагнітної індукції	191
13.8. Явище самоіндукції. Індуктивність	193
13.9. Енергія магнітного поля	195
14. Електромагнітні коливання і хвилі	195
14.1. Змінний електричний струм	195
14.2. Передача і використання електроенергії	199
14.3. Вплив електричного струму на організм людини	200
14.4. Вільні коливання в коливальному контурі	201

14.5. Електромагнітні хвилі	204
14.6. Випромінювання і прийом електромагнітних хвиль	206
15. Геометрична оптика	209
15.1. Розвиток поглядів на природу світла	209
15.2. Закони відбиття світла	211
15.3. Закони заломлення світла	213
15.4. Оптичні прилади	214
15.5. Фізіологічна оптика	216
16. Хвильова оптика	221
16.1. Інтерференція світла	221
16.2. Дифракція світла	222
16.3. Дифракція рентгенівських променів	227
16.4. Поняття про голографію	228
16.5. Дисперсія світла	229
16.6. Поглинання світла, Закон Бугера-Ламберта	232
16.7. Поляризація світла	233
16.8. Основні фотометричні величини	237
17. Квантова природа електромагнітного випромінювання	240
17.1. Теплове випромінювання та його характеристики	240
17.2. Закони теплового випромінювання	242
17.3. Квантова гіпотеза і формула Планка	244
17.4. Джерела світла. Оптична пірометрія	245
17.5. Квантова теорія випромінювання Ейнштейна	246
17.6. Короткохвильова границя гальмового рентгенівського випромінювання	248
17.7. Ефект Комптона	249
17.8. Дуалізм електромагнітного випромінювання	250
18. Атомна фізика. Елементи зонної теорії	252
18.1. Складна будова атома	252
18.2. Досліди Резерфорда з розсіювання α -частинок	252
18.3. Теорія воднеподібного атома за Бором	254
18.4. Гіпотеза де Бройля. Атом у квантовій механіці	255
18.5. Періодична система елементів	259
18.6. Рентгенівські й молекулярні спектри	261
18.7. Спонтанне та вимушене випромінювання. Лазери	265
18.8. Біологічна дія електромагнітного випромінювання	269
18.9. Елементи зонної теорії твердого тіла	270
18.9.1. Енергетичні зони в кристалах	270
18.9.2. Електрична провідність напівпровідників	271

18.10. Транзистор	273
19. Ядерна фізика	275
19.1. Явище радіоактивності	275
19.2. Активність ізотопу	276
19.3. Реєстрація радіоактивних випромінювань	277
19.4. Склад і будова атомного ядра	278
19.5. Ядерні сили. Дефект маси	280
19.6. Ядерні реакції	281
19.7. Дозиметрія радіоактивних випромінювань	283
19.8. Біологічна дія радіоактивного випромінювання	285
Рекомендована література	289

ВСТУП

Біофізика (грец. *βίος* – *життя*, *φύσις* – *природа*) – наука, яка вивчає фізичні закономірності живої природи на всіх рівнях – від молекул і клітин до біосфери в цілому. Біофізика досліджує дію законів фізики на біологічному, молекулярному рівні будови речовини та енергії, використовуючи новітні досягнення фізики, вищої математики, хімії. На думку провідного біофізика М.В. Волькенштейна найлогічніше визначення місця біофізики в системі природничих наук треба починати з визначення поняття фізики. Фізика є провідною наукою про природу і найбільш загальні властивості матерії та закони її руху.

Матерія – філософське поняття (категорія) – це об'єктивна ре-альність, що існує навколо нас. Ми знаємо дві форми матерії: речовина і фізичне поле.

Речовина – це все, що складається з атомів і молекул (різні тіла, предмети, планети, зірки і т.д.).

Фізичне поле (гравітаційне, електричне, магнітне електромагнітне, ядерне) передає взаємодію між частинками речовини (протонами, електронами, іонами, елементарними частинками тощо).

Матерія завжди рухається. Рух сам по собі притаманний матерії. **Рух** – будь-які зміни в природі. Існують такі види руху: механічний, фізичний, хімічний, біологічний та ін. За певних умов матерія переходить з однієї форми в іншу. Спостерігається народження й анігіляція частинок. Під час ядерних перетворень частина маси елементарних частинок перетворюється на енергію. Біологія як наука відмежовує живу природу від неживої і розглядає лише частину, а саме – живу природу, об'єкти якої, до речі, набагато складніші неживих.

Учений М.В. Волькенштейн визначає предмет біологічної фізики детальніше – як фізику явищ життя, які вивчають на всіх рівнях, починаючи з молекул та клітин і закінчуючи біосферою в цілому. І фізика, і біофізика посідають чільне місце в сільськогосподарській освіті. Це пов'язано з тим, що у сільському господарстві є багато питань, які не можна розв'язати, якщо не зважати на теорії, гіпотези, закони, пояснення, що є предметом вивчення фізики та біофізики. Слід також ураховувати науково-технічну революцію,

яка характеризується тим, що порівняно з минулим час від відкриття закономірностей явищ у науці до виробництва дуже малий.

У 1788 р. видатний професор Комов, основоположник агрономічної науки в книзі «Про землеробство» писав, що землеробство повинно мати тісний союз з високими науками, а експериментальна фізика є найкориснішою.

Дисципліна «Біофізика» вивчає закони та уявлення, що лежать в основі розуміння молекулярно-кінетичних механізмів біологічних процесів, фізичні властивості рослин, ґрунту, гідро- і термодинаміку системи «ґрунт – рослина – клімат», фотобіологію рослин та біологічну дію іонізуючих випромінювань, використовуючи як фізичні, так і фізико-хімічні методи. Під час вивчення дисципліни здобувачі знайомляться із сучасними фізичними приладами, методами й устаткуванням в агрономії, технічними засобами для діагностики механічних та молекулярно-кінетичних властивостей різних агрегатних станів речовини, впливу вологості, теплового стану, електрики та магнетизму, освітленості та корпускулярної радіації на властивості біологічних об'єктів, уключаючи систему «рослина – ґрунт – атмосфера».

Біофізика – наука ХХ-го ст., але біофізичні задачі вирішувались і раніше. По-перше, К.А. Тимірязєв, Д.Н. Прянишников, М.І. Вавилов, І.В. Якушкін та інші вчені до рівнозначних факторів життя рослин відносили тепло, світло, вологу, повітря і поживні речовини. По-друге, фізики і фізіологи паралельно вивчали природу теплових, світлових явищ, явищ тертя в газах та явищ перенесення, у тому числі в живих організмах. Енергетичну сторону фотосинтезу вивчав фізіолог К.А. Тимірязєв. Американські вчені У. Гарнер і Г. Аллард уперше виявили фотоперіодизм рослин. Д. Максвелл побудував теорію кольорового зору, Г. Гельмгольц виміряв швидкість розповсюдження нервового імпульсу. Кількість таких прикладів велика. Сучасна біофізика перейшла від вивчення фізичних властивостей організмів і фізичної дії на них до фундаментальних проблем – дослідження спадковості й мінливості, онтогенезу і філогенезу, метаболізму й біоенергетики. Біофізика є частиною фізики і невіддільна від біології. Фізики часто ставляться зверхньо до описової частини біології. Необхідність вивчення зоології і ботаніки є принциповою, без К. Ліннея не могло б виникнути учення Ч. Дарвіна.

Біофізика досягла значних успіхів у поясненні багатьох біологічних явищ: будови і властивостей біологічно функціональних молекул, властивостей і механізмів функціонування таких клітинних структур, як мембрани, біоенергетичні органоїди, механохімічні системи. Успішно розробляють фізико-математичні моделі біологічних процесів. Реалізовано загальнотеоретичні підходи до явищ життя, засновані на термодинаміці, теорії інформації, теорії автоматичного регулювання, на радіаційній біофізиці. У розвиток цих питань значний внесок зробили видатні біофізики Д.М. Гродзинський, Л.М. Волькенштейн, Д.Б. Меріон, Ю.І. Посудін та ін.

Довгий час існували різні теорії живого. Класики матеріалізму вважали життя формою існування білкових тіл. Існували й інші зокрема віталістичні, уявлення згідно з якими явища біології принципово неосяжні на основі фізики і хімії, оскільки існує деяка «життєва сила», так звана «ентелехія» чи біополе, яке ніяк не знайдуть і не досягнуть фізики. Обговорюючи можливості фізичної інтерпретації явищ життя, тобто вплив фізики на розвиток біології, не слід забувати і про зворотний вплив біології на фізику. Закон збереження енергії, перший закон термодинаміки було відкрито Р. Майєром, Д. Джоулем і Г. Гельмгольцем. Як відомо, свої спостереження Р. Майєр зробив на основі живих організмів, спостерігаючи за людьми. Л. Гальвані зробив свої перші спостереження дії електрики на жабках. Гельмгольц теж базувався на біологічних явищах і дотримувався чітких антивіталістичних уявлень. Засновник атомної фізики Нільс Бор вважав, що біологічні закони є додатковими до тих, яким підкоряються неживі тіла. Основноположник сучасних квантових уявлень Е. Шредінгер ще в 1945 р. написав книгу «Що таке життя з точки зору фізики», яка суттєво вплинула на розвиток біофізики і молекулярної біології.

Шредінгер розглянув декілька важливих проблем. Перша з них – термодинамічні основи життя. На перший погляд існує суттєве протиріччя між еволюцією ізольованої фізичної системи до стану з максимальною ентропією (невпорядкованістю) і біологічною еволюцією, що йде від простого до складного. Учений вважав, що «організм харчується негативною ентропією». А це означає, що організми і біосфера не ізольовані, а є відкритими системами, що обмінюються з оточуючим середовищем речовиною і енергією. Нерівноважний стан відкритої системи підтримує відтік ентропії в оточуюче середовище.

Друга проблема – загальні структурні особливості організмів. На думку Шредінгера, організм є аперіодичним кристалом, що стало основою теорії інформатики стосовно будови організмів, клітин, біологічних макромолекул (білків, нуклеїнових кислот).

Третя проблема – відповідність біологічних явищ законам квантової механіки. Шредінгер зазначав квантову природу радіаційного мутагенезу. У той же час застосування квантової механіки в біології не тривіальні, оскільки організми суттєво макроскопічні порівняно з квантовомеханічними об'єктами – квантами світла, атомами, елементарними частинками.

Отже необхідна для життя впорядкованість можлива лише в макроскопічній, тримірній системі, в іншому випадку порядок руйнувався б флуктуаціями. Шредінгер також задавався питанням про стійкість генів, побудованих із легких атомів, яке у подальшому вирішила молекулярна біологія, що встановила двоспіральну будову дезоксирибонуклеїнової кислоти (ДНК).

Суттєвий вклад у біофізику рослин внесли агрокліматологи А.І. Воєйков, П.І. Броунов, А.В. Клоссовський, Г.Т. Селянинов та ін. з точки зору єдності рослинного світу і середовища, виражених в агрокліматичних показниках, механізмів впливу абіотичних факторів на розвиток рослин та урожайність. Вплив складових радіаційного і теплового балансу в 60 – 70-ті рр. вивчали М.І. Будіко і Л.С. Гандін, які пов'язали агрокліматичні показники з кількісними зв'язками сонячної радіації і продуктивності фотосинтезу. З огляду на термоперіодизм рослин З.А. Міщенко у 80-ті рр. на основі аналізу й узагальнення матеріалів про добові зміни температури повітря запропонувала ряд нових термічних показників, різних для дня і ночі, розробила методи їх розрахунку за моделлю «клімат – урожай». У зв'язку зі змінами глобального клімату Землі досить перспективною для мети агрокліматичного районування виявилася модель Х.Г. Тоомінга, заснована на врахуванні сумарної радіації і показника вологозабезпеченості рослин.

1. БІОТИЧНІ ТА АБІОТИЧНІ ФАКТОРИ АГРОЦЕНОЗУ

1.1. Біосфера та її основні компоненти

Життя на Землі було б неможливе без певних умов, які забезпечує так звана біосфера Землі.

Біосфера – це оболонка Землі, що включає нижні шари атмосфери, гідросферу і верхні шари літосфери, склад, структура й енергетика яких значною мірою зумовлені минулою та сучасною життєдіяльністю живих організмів.

Атмосфера – шар повітря, що становить периферійну оболонку планети, через яку здійснюється обмін речовин та енергії з **космосом**, й оточує два інших середовища. Вона простягається від поверхні

Землі понад 1000 км і поступово переходить у міжпланетний простір. За фізичними властивостями атмосферу поділяють на концентричні оболонки: тропосферу, тропопаузу, стратосферу, стратопаузу, мезо-сферу, мезопаузу, термосферу (іоносферу), термопаузу та водневу корону. Нижньою межею атмосфери умовно вважають поверхню суші та океану.

Тропосфера – нижній шар атмосфери (сягає 8–18 км), у якому температура поступово знижується з висотою. У тропосфері відбуваються основні метеорологічні процеси, визначається погода та клімат. Висотний термічний градієнт у середньому становить $6,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ на кілометр. Температура у нижніх шарах тропосфери становить близько $15\text{ }^{\circ}\text{C}$, на верхній межі тропосфери взимку – $65\text{ }^{\circ}\text{C}$, а влітку – $50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Межею тропосфери вважають тропопаузу, у якій зниження температури з висотою припиняється.

Тропопауза – тонкий шар атмосфери між тропосферою і стратосферою, де припиняється зниження температури з висотою, та вище якого атмосфера стає прозорою для теплового випромінювання.

Стратосфера – шар земної атмосфери між тропосферою і мезосферою (від 10–18 км до 40–50 км).

У стратосфері температура повітря зростає з висотою: від $-45\text{...}-75\text{ }^{\circ}\text{C}$ на нижній межі (у тропопаузі) до $-20\text{...}+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ на верхній межі (у стратопаузі). Підвищення температури відбувається завдяки поглинанню сонячного ультрафіолетового випромінювання озоновим шаром.

Стратопауза – шар земної атмосфери між стратосферою та мезосферою. Визначається існуванням температурного піку, зумовленого поглинанням ультрафіолетового випромінювання Сонця озоном. Розташована на висоті 50–60 км.

Мезосфера – шар атмосфери між стратосферою і термосферою на висоті 50–80 км. Характеризується зниженням температури від 0° до -90° C. Головним енергетичним процесом у мезосфері є поглинання сонячного випромінювання озоном, вуглекислим газом, водяною парою та розсіювання ультрафіолетового випромінювання молекулами кисню.

Мезопауза – шар атмосфери, що є межею між мезосферою і термосферою, розташований на висоті 80–90 км над рівнем моря. У мезопаузі знаходиться температурний мінімум, який становить близько 223 К (-50° C), вище неї (до висоти близько 400 км) температура знову починає зростати. Мезопауза збігається з нижньою межею області активного поглинання рентгенівського та короткохвильового ультрафіолетового випромінювання Сонця.

Термосфера – шар атмосфери планети, вищий за мезосферу (80–800 км), у якому відбуваються основні процеси поглинання та перетворення короткохвильового сонячного випромінювання. Температура повітря в термосфері зростає від 200 К до 500–2000 К залежно від міри сонячної активності. Причиною зростання є поглинання ультрафіолетового та рентгенівського випромінювання Сонця на висоті 150–300 км, зумовлене іонізацією атмосферного кисню. У нижній частині термосфери зростання температури значною мірою зумовлене енергією, що виділяється при *рекомбінації атомів кисню в молекули*.

Термопауза – шар верхньої атмосфери планети, розташований над термосферою, що характеризується переходом до сталої температури (зі збільшенням відстані від планети). Розташування термопаузи в атмосфері Землі залежить від рівня сонячної активності й може коливатися від 400 до 800 км. Температура становить 500–2000 К залежно від часу доби та сонячної активності. Основні елементи хімічного складу атмосфери: азот – N_2 (78 %), кисень – O_2 (21 %), аргон – Ar (1 %), вуглекислий газ – CO_2 (0,03 %).

Гідросфера – водна оболонка Землі, що містить світовий океан, ріки, озера та підземні води. Унаслідок високої рухливості вода проникає в різні природні утворення, навіть найчистіші атмосферні води містять від 10 до 50 мг/л розчинних речовин. Найважливіша

роль в житті живих організмів належить таким елементам, як нітроген (N), фосфор (P), калій (K), магній (Mg) і сульфур (S), що засвоюються ними. Головною особливістю океанічної води є те, що основні іони характеризуються постійним співвідношенням у всьому обсязі світового океану.

Літосфера – середовище, обмежене верхніми шарами земної поверхні, тобто тверда поверхня материків, що складається з осадових, магматичних і метаморфічних порід. У поверхневому шарі літосфери відбувається взаємодія живої матерії з мінеральною (неорганічною). Залишки організмів після розкладання переходять у гумус (органічну речовину ґрунту). Складовими частинами ґрунту є мінерали, органічні речовини, живі організми, вода, повітря.

Педосфера – ґрунтова оболонка планети. Переважні елементи хімічного складу літосфери: кисень (O), кремній (Si), алюміній (Al), залізо (Fe), кальцій (Ca), магній (Mg), натрій (Na), калій (K).

Деякі дослідники (зокрема академік Вернадський) вважають, що на Землі ще існує так звана *ноосфера*, (розумова, духовна) сфера у вигляді набутих знань, технологій.

1.2. Біоценоз та агроценоз

Принциповою особливістю живої природи є її необмежена багатоманітність. Зараз відомо близько $3 \cdot 10^6$ видів різних живих істот. Кількість особин багатоклітинних рослин чи безхребетних взагалі не піддається оцінці. На думку професора Ю. Посудіна, у біосфері мешкають близько 10 000 видів рослин, 3 000 видів ссавців, 25 000 видів птахів, ще більше риб, майже 1 млн комах. Живі організми можна поділити на мікроорганізми, рослини і тварини. Ми поки що не розрізняємо індивідуальності представників цього штаму одноклітинних, але такі особливості існують і потрібно це враховувати. Тоді ми побачимо, що немає двох однакових організмів на Землі, і це пояснюється генетичною мінливістю.

Мінливість неживої природи на макрорівні (наприклад, поверхня кристалів, каміння) на відміну від живих організмів не підкріплена спадковістю, тому не грає суттєвої ролі. Основи безмежної багатоманітності живих систем визначає макромолекулярна будова генів і організмів. Полімерні ланцюги, макромолекули не підкоряються основному закону хімії – закону сталості складу. Якщо уявити собі сополімер із двох сортів мономерних одиниць, то кількість різних ланцюгів, що містять два типи мономерів, дорів-

нює $2^{100} \approx 10^{30}$. Таким чином, у цьому макроскопічному зразку може не бути двох однакових макромолекул. Тому біологічну мінливість визначають різноманіттям генів, тобто досить протяжних ділянок ДНК, що є сополімерами.

Суспільство живих організмів утворює **біоценоз** (мікроорганізми, рослини, тварини, людина), а специфічне фізико-хімічне оточення цих організмів називають **біотопом** (атмосфера, літосфера, гідросфера). Сукупність біотопу з біоценозом становить **екосистему** (табл.1.1). Навколишнє природне середовище – це сукупність природних і змінених діяльністю людини абіотичних та біотичних факторів, що безпосередньо або опосередковано впливають на людину.

1.3. Біотичні, абіотичні та антропогенні фактори

Екологічними факторами називають все, що впливає на живі організми з боку живої та неживої природи.

Антропогенними факторами називають діяльність людини, що впливає на живі організми.

Абіотичні фактори – це компоненти та явища неживої, неорганічної природи, що впливають на живі організми. Серед них виділяють такі види:

Фізичні (кліматичні) фактори: тиск, рух повітря, вітер, вологість, атмосферні опади, температура, сонячне випромінювання, радіоактивне випромінювання.

Гідрографічні фактори (фактори водного середовища) – густина води, в'язкість, температура, теплоємність, світловий режим, прозорість.

Едафічні (грунтові) фактори – структура і склад ґрунтів, уміст води, вологість, колір ґрунту.

Хімічні фактори – хімічний склад компонентів у біосфері, забруднення хімічної природи.

Біотичні фактори – сукупність впливів життєдіяльності одних організмів на життєдіяльність інших, а також на неживе середовище мешкання.

Ці фактори діють як у локальних, так і в планетарно-космічних масштабах. Циклічність деяких факторів у часі організми використовують як сигнали для початку фізіологічних процесів. Довжина дня впливає на початок росту, цвітіння рослин. Освітлен-

ня та фотоперіодизм мають певне значення і для тварин. У наземних екосистемах найважливішими факторами є світло, температура і вода. У водному середовищі – уміст кисню, солоність. Дію одного адіабатичного фактора важко відокремити від іншого, тому що організми відчують їх сумісну дію. Різні види факторів наведено в табл. 1.1. Абіотичні та біотичні фактори зазнають певних коливань, і коли вони перевищують деякі величини, це спричиняє стресові ситуації. На стан довкілля впливає забруднення.

Забруднення – несприятлива зміна навколишнього середовища, яка цілком або частково є результатом людської діяльності, що безпосередньо або опосередковано впливає на розподіл енергії та рівні радіації, на фізико-хімічні властивості довкілля й умови існування живих істот. Ці зміни можуть діяти на людину безпосередньо або опосередковано через сільськогосподарські ресурси, воду чи інші біологічні продукти та речовини.

Таблиця 1.1

Екологічні фактори середовища

Абіотичні	Біотичні	Антропогенні
<i>Фізичні:</i> фізичні поля, іонізуюче випромінення, коливання, хвилі, вітер, течії	<i>Фітогенні:</i> різноманітний вплив рослин. Прямий вплив – механічні контакти, симбіоз тощо.	<i>Планові</i> (передбачені) впливи людини
<i>Хімічні:</i> газовий склад повітря, склад води	Опосередкований вплив рослин на середовище	<i>Непередбачені</i> (випадкові) впливи людини
<i>Кліматичні:</i> світло, температура, погода, вітер тощо	<i>Зоогенні:</i> вплив тварин	<i>Впливи</i> , зумовлені діяльністю людини
<i>Орографічні:</i> рельєф місцевості	<i>Мікробогенні:</i> вплив мікроорганізмів	<i>Впливи</i> , зумовлені соціокультурною діяльністю людини
<i>Едафічні:</i> склад ґрунту, вологоємність	<i>Мікогенні:</i> вплив грибів	

Контрольні запитання

1. Що таке атмосфера?
2. На які сферичні оболонки поділяють атмосферу?
3. Що таке тропосфера, тропопауза?
5. Що таке стратосфера, стратопауза?
7. Що таке мезосфера, мезопауза?
8. Що таке термосфера, термопауза?
9. Що таке воднева корона?
10. Що таке літосфера?
11. Що таке біоценоз?
12. Що таке агроценоз?
13. Що таке біотоп?
14. Що таке екосистема?
15. Які фактори називають абіотичними?
16. Які абіотичні фактори ви знаєте?
17. Які фактори називають біотичними?
18. Які біотичні фактори ви знаєте?
19. Які фактори називають антропогенними?
20. Які антропогенні фактори ви знаєте?

2. КІНЕМАТИКА ТА ДИНАМІКА МАТЕРІАЛЬНОЇ ТОЧКИ І ТІЛА

2.1. Кінематика поступального руху

Усі тіла і частинки в природі перебувають у неперервному русі. Для опису механічного руху будь-якого тіла потрібно вказати на інше тіло, яке умовно вважатиметься нерухомим. Таке тіло називають тілом відліку.

Для опису механічного руху у фізиці приймають спрощені моделі реальної дійсності: матеріальна точка, ідеальний газ та ін.

Матеріальна точка – макроскопічне тіло, розмірами і формою якого можна знехтувати в умовах задачі.

Абсолютно тверде тіло – фізичне тіло, яке не зазнає деформацій у процесі руху за будь-яких умов.

Система відліку – сукупність тіла відліку, зв'язаної з ним системи координат, вибраного засобу вимірювання часу.

Траєкторія – сукупність точок простору, які послідовно проходить матеріальна точка, що рухається. Форма траєкторії залежить від вибору системи відліку. Існують три способи опису механічного руху:

1. Функціональний (основне рівняння руху – залежність шляху від часу): $S = S(t)$.

2. Координатний (основне рівняння руху – залежності координат від часу): $r_x = x(t)$; $r_y = y(t)$; $r_z = z(t)$.

Оскільки декартові координати точки чисельно збігаються з проєкціями вектора на осі координат, то має місце розкладання:

$$\vec{r} = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k},$$

де $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – одиничні вектори (орти) уздовж додатних напрямків осей ОХ, ОУ, ОZ (рис.1.3) відповідно. Довжина кожного з ортів дорівнює $|\vec{i}| = |\vec{j}| = |\vec{k}| = 1$.

3. Векторний (основне рівняння руху – залежність радіуса-вектора від часу): $\vec{r} = \vec{r}(t)$,

де $\vec{r} = \vec{r}_x + \vec{r}_y + \vec{r}_z$; $r = r(t)$; де $\vec{r} = \vec{r}_x + \vec{r}_y + \vec{r}_z$;

за модулем $r = \sqrt{r_x^2 + r_y^2 + r_z^2}$;

$$\cos \alpha = \frac{r_x}{r}; \quad \cos \beta = \frac{r_y}{r};$$

$$\cos \gamma = \frac{r_z}{r};$$

$$\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma = 1.$$

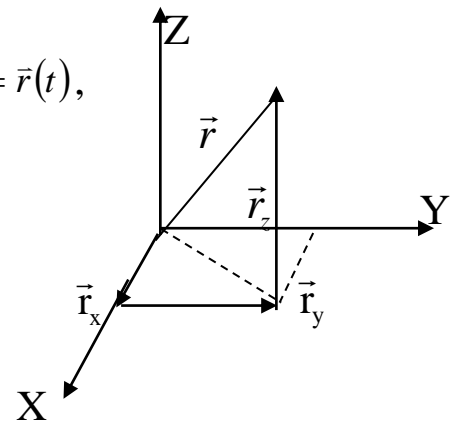


Рис. 2.1

Основні характеристики механічного руху

Шлях – довжина ділянки траєкторії. Шлях S (або ΔS), пройдений точкою з її початкового положення, є скалярною функцією часу: $S = S(t)$. Шлях є сумою довжин усіх ділянок траєкторії, тому вона не може бути негативною величиною (рис. 2.2, 2.3).

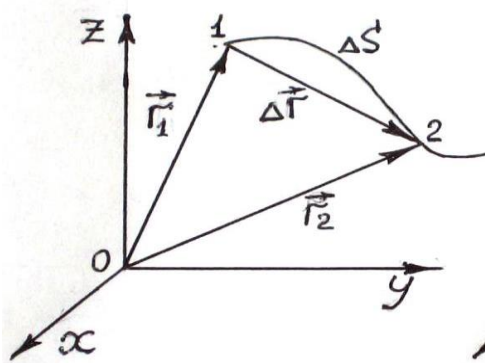


Рис. 2.2

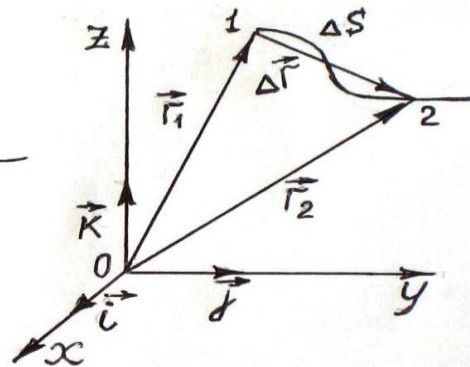


Рис. 2.3

Переміщення – це спрямований відрізок прямої, що з'єднує початкове і кінцеве положення тіла $\Delta \vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1$.

Очевидно, що за модулем переміщення менше або дорівнює довжині шляху $\Delta r \leq \Delta S$ див. (рис. 2.3). Рух матеріальних об'єктів характеризується швидкістю.

Середньою шляховою швидкістю нерівномірного руху точки на шляху S називають фізичну величину, що дорівнює відношенню загального шляху до часу руху:

$$\langle v \rangle = \frac{S}{t}. \quad (2.1)$$

Миттєва швидкість (за модулем) дорівнює границі, до якої прямує відношення шляху ΔS до часу, якщо час прямує до нуля:

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta S}{\Delta t} = \frac{dS}{dt}. \quad (2.2)$$

Тобто миттєва швидкість точки дорівнює першій похідній від шляху за часом. У разі такого визначення матимемо лише абсолютну величину швидкості, у той час як *швидкість* – це величина, що характеризується ще й напрямком.

Миттєва швидкість (як векторна величина) дорівнює першій похідній за часом від радіуса-вектора цієї точки \vec{r} :

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \frac{d\vec{r}}{dt}. \quad (2.3)$$

Вектор швидкості \vec{v} завжди спрямований за дотичною до траєкторії і може бути представлений у проекціях на координати:

$$\vec{v} = \vec{v}_x + \vec{v}_y + \vec{v}_z, \quad (2.4)$$

де $\vec{v}_x, \vec{v}_y, \vec{v}_z$ – проекції швидкості на осі координат. Вони дорівнюють:

$$v_x = \frac{dx}{dt}, v_y = \frac{dy}{dt}, v_z = \frac{dz}{dt}. \quad (2.5)$$

Модуль вектора швидкості:

$$v = |\vec{v}| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}. \quad (2.6)$$

Під час нерівномірного руху швидкість може змінюватись і за величиною, і за напрямком. Для характеристики зміни швидкості введемо поняття прискорення.

Прискорення – це векторна фізична величина, що дорівнює зміні швидкості за одиницю часу:

$$\vec{a} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \frac{d\vec{v}}{dt}, \quad (2.7)$$

тобто прискорення – це перша похідна від швидкості за часом.

Будь-який складний рух складається з найпростіших. Розрізняють два простих типи рухів – поступальний і обертальний. При **поступальному русі** траєкторії усіх точок твердого тіла ідентичні в будь-який момент часу, тобто швидкість і прискорення однакові для всіх точок твердого тіла.

2.2. Кінематика обертального руху

За формою траєкторії розрізняють прямолінійний та криволінійний рухи. Найпростішим криволінійним рухом є обертальний.

Обертальним називають такий рух, при якому всі точки тіла описують кола з центрами, розміщеними на одній прямій, яку називають віссю обертання.

Шлях і лінійна швидкість не можуть бути основними кінематичними характеристиками, тому що вони залежать від відстані до осі обертання (рис. 2.4). Положення точки можна визначити завдяки відліку кута φ , який утворюють радіус точки і початковий радіус. Таким чином, **кінематичне рівняння обертального руху – це залежність кута обертання від часу: $\varphi = \varphi(t)$** . Кутове переміщення $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$, а за дуже малий час $dt \rightarrow d\varphi$.

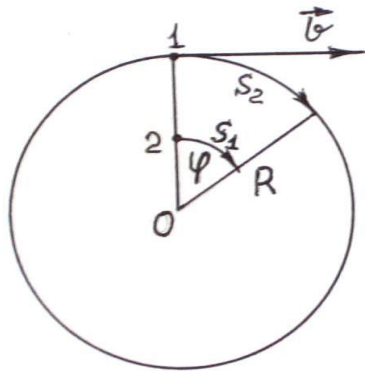


Рис. 2.4

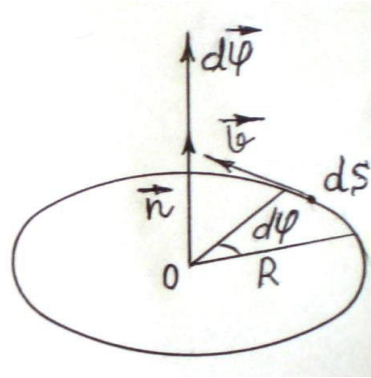


Рис. 2.5

Вектор кутового переміщення $d\vec{\varphi} = d\varphi \cdot \vec{n}$ – вектор, що за модулем дорівнює куту елементарного оберту $d\varphi$ і спрямований по осі обертання (рис.1.5). Напрямок вектора кутового переміщення визначають за правилом буравчика (правило гвинта).

Середня кутова швидкість $\langle \omega \rangle$ – фізична величина, що дорівнює кутовому переміщенню $\Delta\varphi$ за одиницю часу (вимірюють у рад/с):

$$\langle \omega \rangle = \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}. \quad (2.8)$$

Миттєва кутова швидкість $\vec{\omega}$ – це похідна від переміщення за часом:

$$\vec{\omega} = \frac{d\vec{\varphi}}{dt}. \quad (2.9)$$

Миттєва кутова швидкість $(\vec{\omega})$ – вектор, спрямований по осі обертання. Напрямок кутової швидкості визначається за правилом буравчика.

Кутове прискорення $(\vec{\varepsilon})$ – зміна вектора кутової швидкості за одиницю часу.

Середнє кутове прискорення $\langle \vec{\varepsilon} \rangle$ дорівнює зміні швидкості за одиницю часу (вимірюють у рад/с²):

$$\langle \vec{\varepsilon} \rangle = \frac{\Delta\vec{\omega}}{\Delta t}. \quad (2.10)$$

Миттєве кутове прискорення $\vec{\varepsilon}$ – це похідна від кутової швидкості за часом:

$$\vec{\varepsilon} = \frac{d\vec{\omega}}{dt}. \quad (2.11)$$

Напрямок векторів \vec{v} , $\vec{\omega}$ та $\vec{\varepsilon}$ під час прискореного ($d\omega > 0$) та сповільненого ($d\omega < 0$) рухів зображено на рис. 2.6; 2.7.

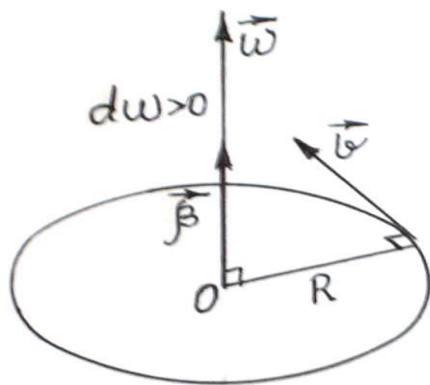


Рис. 2.6

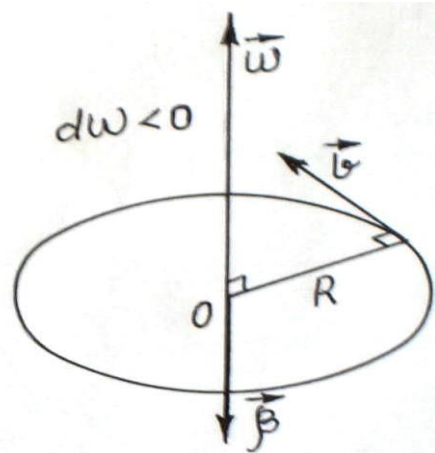


Рис. 2.7

Період обертання T – час одного повного оберту на кут 2π рад.

Частота обертання $\nu = \frac{1}{T}$ – число обертів за одиницю часу.

Зв'язок між лінійними і кутовими параметрами

Шлях точки по дузі кола $\Delta S = R\Delta\varphi$, де $\Delta\varphi$ кут в радіанах, тоді

$$v = \lim \frac{\Delta S}{\Delta t} = \lim \frac{R\Delta\varphi}{\Delta t} = R \lim \frac{\Delta\varphi}{\Delta t} = R \frac{d\varphi}{dt} = \omega R. \quad (2.12)$$

З формули (2.12) видно, що лінійна швидкість зростає зі збільшенням радіуса. Із урахування, що $\omega \perp R$ і $\sin(\omega \wedge R) = 1$ лінійна швидкість для обертального руху дорівнює:

$$\vec{v} = \left[\vec{\omega} \times \vec{R} \right], \quad (2.13)$$

тобто векторному добутку кутової швидкості на радіус-вектор точки.

2.3. Повне прискорення при криволінійному русі

Під час нерівномірного руху швидкість може змінюватись як за модулем, так і за напрямком. Напрямок векторів швидкості й зміни швидкості при русі за криволінійною траєкторією показано на

рис. 2.8. Зміна швидкості за напрямком за одиницю часу характеризується нормальним (доцентровим) прискоренням $\alpha_n = v^2 / R$, зміна

швидкості за модулем за одиницю часу – тангенціальним (дотичним) прискоренням $a_\tau = dv/dt$.

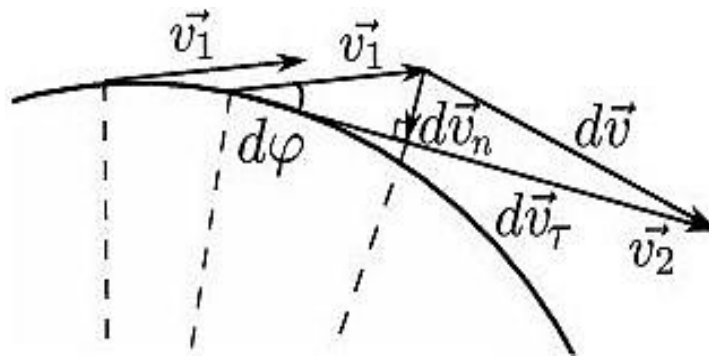


Рис. 2.8

Вектор повного прискорення дорівнює сумі нормального і тангенціального прискорення:

$$\vec{a} = \vec{a}_n + \vec{a}_\tau. \quad (2.14)$$

Модуль повного прискорення дорівнює кореню квадратному із суми квадратів нормального і тангенціального прискорення:

$$a = \sqrt{a_n^2 + a_\tau^2}. \quad (2.15)$$

2.4. Закони динаміки матеріальної точки

Динаміка вивчає причини руху тіл. В основі динаміки – закони Ньютона.

• **Перший закон Ньютона (закон інерції): існують такі системи відліку, відносно яких будь-яке тіло зберігає стан руху доки інші тіла не змусять його змінити цей стан**

($v = const$). Властивість тіл зберігати стан руху називають **інертністю**. Системи відліку, у яких виконуються закони механіки, називають інерціальними. Другий закон Ньютона встановлює зв'язок між зміною стану руху і дією інших тіл. Експерименти свідчать, що причина зміни стану руху – сила. **Сила** – векторна фізична величина, що є мірою взаємодії тіл. Сила характеризується модулем, напрямком і точкою прикладання.

• **Другий закон Ньютона: зміна стану руху (\vec{a}) матеріального об'єкта пропорційна силі, яка її викликає, і збігається з нею за напрямком:**

$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{1}{m} \vec{F}, \quad (2.16)$$

де m – маса.

З формули (2.16) випливає, що зміна стану руху тіл (прискорення) зворотно пропорційна масам тіл, тобто чим більше маса, тим повільніше тіло змінює свою швидкість. **Маса** – скалярна фізична величина, що є мірою інертності й гравітації. Маса є адитивною величиною, тобто маса тіла дорівнює масі усіх її частинок. У міжнародній системі одиниць СІ одиниця маси – кілограм (1кг) є основною одиницею вимірювань. Рівняння руху за другим законом Ньютона:

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \sum_{i=1}^N \vec{F}_i. \quad (2.17)$$

• **Третій закон Ньютона: матеріальні об'єкти взаємодіють із силами, рівними за модулем і протилежними за напрямком** (рис. 2.9):

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}.$$

(2.18)



Рис. 2.9

2.5. Імпульс. Закон збереження імпульсу

У класичній механіці за швидкостей руху, значно менших від швидкості світла у вакуумі, маса є сталою величиною. Тоді

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{d}{dt}(m\vec{v}) = \frac{d\vec{p}}{dt}, \quad (2.19)$$

де векторну величину $\vec{p} = m\vec{v}$ називають імпульсом матеріальної точки.

Загальна формула другого закону динаміки (через імпульс): **швидкість зміни імпульсу механічної системи** (похідна за часом від імпульсу системи) **дорівнює головному вектору зовнішніх сил:**

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}. \quad (2.20)$$

Сукупність матеріальних точок (тіл), які розглядають як єдине ціле, має назву механічної системи. Механічну систему, у якій тіла взаємодіють тільки між собою, називають **замкненою**.

Якщо система замкнена $\vec{F} = 0$ і $\frac{d\vec{P}}{dt} = 0$, то імпульс системи не змінюється з часом. Закон збереження імпульсу: **величина і напрямок сумарного імпульсу замкненої механічної системи, у якій діють сили пружності й гравітації (так звані консервативні сили), не змінюється з часом.**

$$\vec{P} = m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 + \dots + m_n\vec{v}_n = \text{const..} \quad (2.21)$$

2.6. Центр мас (центр інерції) механічної системи

Центром мас системи матеріальних точок називають геометричну точку С, радіус-вектор якої дорівнює:

$$\vec{r}_C = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \vec{r}_i}{m}, \quad (2.22)$$

де m – загальна маса всієї системи.

Якщо радіуси-вектори \vec{r}_i проведено із центра мас, то $\vec{r}_C = 0$. Швидкість центра мас:

$$\vec{v}_C = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n m_i \vec{v}_i = \frac{\vec{P}}{m}. \quad (2.23)$$

Диференціюючи це рівняння за часом, отримуємо:

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = m \frac{d\vec{v}_C}{dt} = m\vec{a}_C = \vec{F}. \quad (2.24)$$

Центр мас механічної системи рухається як матеріальна точка, у якій зосереджено всю масу системи.

2.7. Робота й енергія. Потужність

Робота постійної сили на прямолінійному шляху S – це фізична величина, що дорівнює скалярному добутку сили на переміщення (рис. 2.10):

$$A = F\Delta r \cos \alpha = FS \cos \alpha. \quad (2.25)$$

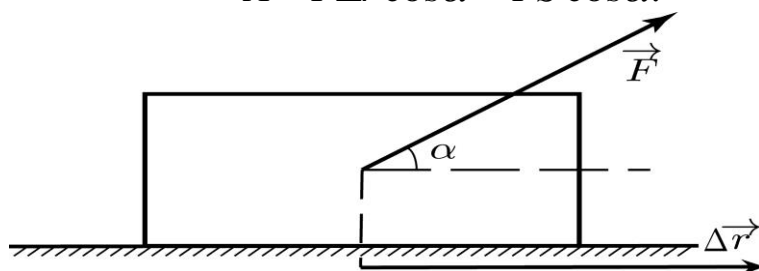


Рис. 2.10

Узагалі сила може змінюватись і за модулем, і за напрямком (рис. 2.11).

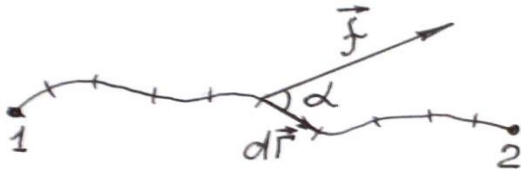


Рис. 2.11

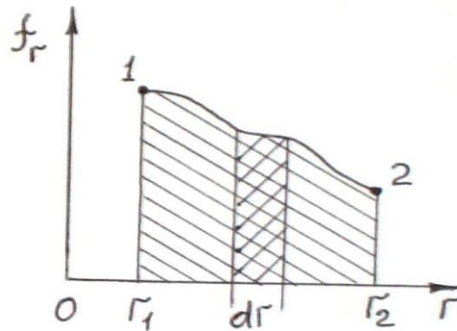


Рис. 2.12

Елементарна робота сили \vec{f} на дуже малому (елементарному) переміщенні $d\vec{r}$ дорівнює скалярному добутку сили на переміщення:

$$dA = f dr \cos \alpha = \vec{f} d\vec{r}. \quad (2.26)$$

Загальна робота на шляху 1–2 (рис. 2.12) дорівнює сумі елементарних робіт, тобто площі під кривою 1–2 на графіку рис. 2.12:

$$A_{12} = \int_1^2 \vec{f} d\vec{r}. \quad (2.27)$$

Одиниця вимірювання роботи – Джоуль (Дж): $[A] = \text{Нм} = \text{Дж}$.

Потужність – скалярна фізична величина, що дорівнює роботі, яка виконується за одиницю часу:

$$P = \frac{dA}{dt} = \frac{d}{dt}(f dr \cos \alpha) = f v \cos \alpha = (\vec{f} \vec{v}). \quad (2.28)$$

Одиниця вимірювання потужності – Ватт (Вт):

$$[P] = \frac{\text{Дж}}{\text{с}} = \text{Вт}.$$

Енергія – найуніверсальніша міра різних форм руху матерії, яка описує якісні й кількісні зміни стану руху. Запишемо рівняння руху тіла з точки 1 у точку 2 під дією постійної сили f і помножимо обидві частини рівняння на елементарне переміщення $dr = v dt$:

$$m \frac{dv}{dt} v dt = f dr. \quad (2.29)$$

У формулі $f dr$ – елементарна робота на шляху dr , а вираз зліва:

$$m v \frac{dv}{dt} dt = m v dv = d \left(\frac{m v^2}{2} \right) = dW^k \quad (2.30)$$

Вираз $W^k = \frac{m v^2}{2} + const$ – кінетична енергія. Проінтегруємо співвідношення (2.29) з урахуванням формули (2.30):

$$\int_1^2 d \left(\frac{m v^2}{2} \right) = \int_1^2 f dr. \quad (2.31)$$

$$\frac{m v_2^2}{2} - \frac{m v_1^2}{2} = A_{12}. \quad (2.32)$$

З формули (2.32) випливає, що **зміна кінетичної енергії тіла дорівнює роботі, яку виконують над тілом** (теорема про зміну кінетичної енергії), тобто **робота сили – кількісна міра зміни кінетичної енергії**. Таким чином, кінетична енергія характеризує здатність тіла виконати роботу.

2.8. Силове потенціальне поле. Потенціал

Силове поле – це область простору, у якому на частинку діє якась сила \vec{F} . Узагалі сила залежить від координат і часу $\vec{F} = f(x, y, z, t)$. Якщо сила не залежить від часу, то поле називають стаціонарним $\vec{F} = f(x, y, z)$. Якщо сили діють у напрямку якогось центра або від нього – центральні-симетричні. Як приклад розглянемо гравітаційне поле Землі.

Ісаак Ньютон сформулював закон всесвітнього тяжіння, згідно з яким **матеріальні точки (або сферичні тіла) притягуються одна до одної із силами, пропорційними добутку їх мас m_1 і m_2 та обернено пропорційними квадрату відстані між ними:**

$$\vec{F} = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (2.33)$$

де $\gamma = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Нм}^2/\text{кг}^2$ – гравітаційна стала.

На будь-яке тіло, розташоване недалеко від Землі, за законом всесвітнього тяжіння діє сила тяжіння F_m :

$$F_m = \gamma \frac{mM}{R^2} = mg, \quad (2.34)$$

де M – маса Землі; R – радіус Землі; m – маса тіла; $g = \frac{\gamma M}{R^2}$ – прискорення вільного падіння (напруженість гравітаційного поля Землі).

Прискорення вільного падіння на Землі неоднакове. Відхилення від стандартної величини прискорення (на широті 45° і висоті рівня моря) $g = 9,80665 \text{ м/с}^2$ зумовлено низкою причин:

- обертанням Землі.
- неідеальною формою Землі;
- висотою над рівнем моря;
- неоднорідністю Землі.

Сила тяжіння тіла, яке знаходиться на висоті h над поверхнею Землі:

$$F_m = \gamma \frac{mM}{(R+h)^2}. \quad (2.35)$$

Підрахуємо роботу гравітаційної сили з переміщення маси m з точки на відстані R_1 від центра Землі в точку на відстані R_2 :

$$A = \int_{R_1}^{R_2} F dr = \gamma mM \int_{R_1}^{R_2} \frac{dr}{r^2} = - \left(\frac{\gamma mM}{R_2} - \frac{\gamma mM}{R_1} \right) = -(W_2^n - W_1^n). \quad (2.36)$$

Відомо, що робота виконується за рахунок зменшення енергії, тобто вираз $W^n = \frac{\gamma mM}{r}$ являє собою потенціальну енергію гравітаційного поля, що зменшується при збільшенні відстані до центру Землі.

Отже, робота гравітаційної сили дорівнює зміні потенціальної енергії, узятій з оберненим знаком (2.36). Згідно з формулою (2.36) робота в гравітаційному полі не залежить від форми шляху, а робота по замкненому шляху дорівнює нулю. **Сили, робота яких не залежить від форми шляху, називають консервативними.** Винесемо масу тіла за дужки:

$$A = -m \left(\frac{\gamma M}{R_2} - \frac{\gamma M}{R_1} \right) = -m (\varphi_2^g - \varphi_1^g), \quad (2.37)$$

де $\varphi^g = \frac{\gamma M}{R}$ – потенціал гравітаційного поля.

Потенціал гравітаційного поля не залежить від маси тіла m , а залежить тільки від відстані між центрами мас Землі й тіла.

У диференціальній формі зв'язок між елементарною роботою й потенціальною енергією описує формула: $\delta A = Fdr = -dW^n$.

Функція $W^n(r)$ повністю визначає силу F за модулем і напрямом:

$$F = -\frac{dW^n}{dr} \quad \text{або} \quad F_x = -\frac{\partial W^n}{\partial x}, \quad F_y = -\frac{\partial W^n}{\partial y}, \quad F_z = -\frac{\partial W^n}{\partial z}. \quad (2.38)$$

Залежність сили і потенціальної енергії у векторній формі:

$$\vec{F} = -\left(\frac{\partial W^n}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial W^n}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial W^n}{\partial z} \vec{k} \right) = -\text{grad}W^n, \quad (2.39)$$

де $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – одиничні вектори (орти) координатних осей.

Конкретний вигляд W^n залежить від характеру силового поля. На невеликій висоті h над поверхнею Землі ($h \ll R$) потенціальна енергія тіла дорівнює:

$$W^n = Ph = m \frac{\gamma M}{(R+h)^2} h \approx mgh. \quad (2.40)$$

Графік залежності потенціальної енергії від зміщення (відстані) називають потенціальною кривою. Аналіз потенціальних кривих дозволяє визначити характер руху тіла. Графік потенціальної енергії тіла масою m , піднятого на висоту h над поверхнею Землі, показано на рис. 2.13. Кут нахилу прямої, що проходить через початок координат, збільшується зі зростанням маси тіла, оскільки $\text{tg}\alpha = mg$. Якщо повна енергія тіла дорівнює W , то на висоті тіло має потенціальну енергію W^n , що визначається відрізком вертикалі, обмеженим точкою h на осі абсцис і графіком $W^n(h)$.

Графік залежності потенціальної енергії пружно-деформованого тіла від деформації має вигляд параболи (рис. 2.14), де задану повну енергію W визначають горизонтальною прямою, а значення W^k і W^n задають так само, як і на рис. 2.13. Експериментально доведено, що в механіці виконується закон збереження механічної енергії: *у замкненій механічній системі тіл, між якими діють тільки консервативні сили (пружності й гравітації), загальна (кінетична і потенціальна) енергія зберігається, тобто не змінюється з часом.*

Математично закон збереження механічної енергії записують так:

$$\frac{d}{dt} (W^k + W^n) = 0; \quad (W^k + W^n) = \text{const}. \quad (2.41)$$

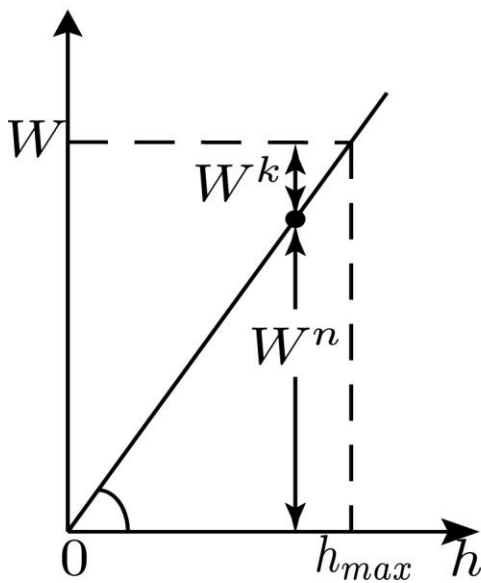


Рис. 2.13

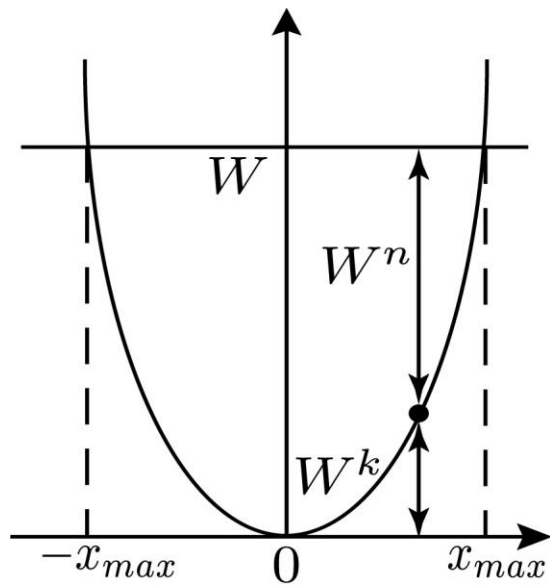


Рис. 2.14

2.9. Сили в механіці

Науці відомо чотири фундаментальних види взаємодії: гравітаційна, електромагнітна, слабка, сильна (ядерна). У механіці вивчають гравітаційну й електромагнітну взаємодії. Сили пружності, тертя, реакції опору, натягу мають електромагнітну природу.

Сила тяжіння ($\vec{F}_m = mg$) – це сила, з якою тіла притягаються до Землі. Вона спрямована перпендикулярно до поверхні землі. Точка прикладання сили тяжіння – центр мас цього тіла.

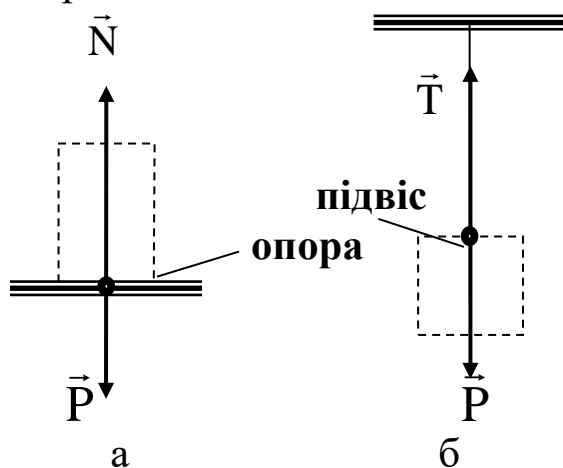


Рис 2.15

Вага тіла (P) – це сила, з якою тіло діє на опору (рис. 2.15, а) або підвіс. Вона прикладена до опори або підвісу. Дію тіла на підвіс (трос, нитка, канат) показано на рис. 2.15, б, де сили реакції опори \vec{N} і натягу підвісу \vec{T} . \vec{N} – **сила реакції опору** – це сила, що виникає при взаємодії тіла з опорою за третім законом Ньютона. У цьому разі внаслідок притягнення тіла до Землі сила \vec{N} також діє

перпендикулярно до опори (рис. 2.15,а).

Сила натягу (T або \vec{F}_H) – це сила, що виникає при взаємодії тіла з підвісом унаслідок притягнення тіла до Землі (рис. 2.15, б).

Тертям називається явище взаємодії дотичних тіл, що перешкоджає їхньому відносному переміщенню. Розрізняють внутрішнє, зовнішнє і в'язке тертя.

Сила внутрішнього тертя – це сила, що виникає між частинами одного тіла під час деформації.

Сила в'язкого тертя з'являється під час руху тіла в рідині або газі.

Сила зовнішнього тертя – це сила, що виникає при переміщенні одного тіла по поверхні іншого. Сила зовнішнього тертя завжди спрямована в бік, протилежний напрямку руху тіла. Силу зовнішнього тертя обчислюють за формулою:

$$F_{тер} = \mu N, \quad (2.42)$$

де N – сила реакції опори, μ – коефіцієнт тертя.

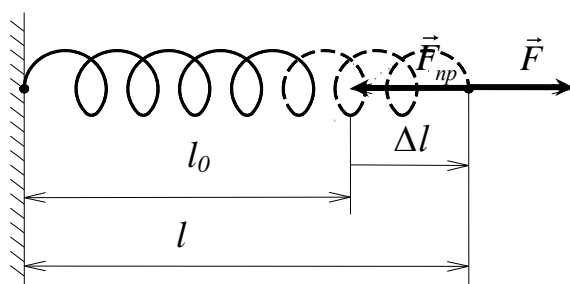
Розрізняють три види зовнішнього тертя: **тертя спокою, тертя ковзання, тертя кочення**.

Для них існує таке співвідношення між коефіцієнтами тертя:

$$\mu_{сп} > \mu_{ков} > \mu_{коч}.$$

Причина зовнішнього тертя – це шорсткість поверхні тіл, що взаємодіють, а також взаємодія між атомами дотичних тіл. Для зменшення тертя поверхню взаємодіючих тіл шліфують, полірують і змазують мастилом.

Деформація – це процес зміни розмірів і форми тіл під дією сили. Розглядають два види деформації: **деформація першого роду** – зовнішні сили діють перпендикулярно до поверхні, що деформується; **деформація другого роду** – зовнішні сили дотичні до поверхні, що деформується (деформація зсуву).



Якщо тіло приймає початкову форму і розміри після припинення дії сили \vec{F} , то **деформація пружна**, а якщо форма тіла не відновлюється, то **деформація пластична**.

Рис. 2.16

Мірою деформації є абсолютний зсув з положення рівноваги (подовження) $x = \Delta l = l - l_0$. У разі пружної деформації виникає **сила пружності** \vec{F}_{np} (рис. 2.16). Експерименти свідчать, що пружна деформація пропорційна силі пружності. Залежність між \vec{F}_{np} і пружною деформацією знайшов англійський учений Гук.

• **Закон Гука: сила пружності \vec{F}_{np} прямо пропорційна зсуву x і спрямована в бік, протилежний зсуву.** Формула закону Гука:

$$\vec{F}_{np} = -k\vec{x} \quad \text{або} \quad F_{np} = kx, \quad (2.43)$$

де k – **коефіцієнт пружності** (жорсткості).

Коефіцієнт k залежить від речовини, з якої виготовлене тіло і чисельно дорівнює силі, що потрібна для подовження тіла на оди-

ницю довжини: $[k] = \frac{H}{m}$.

При деформації (розтягуванні або стискуванні) стрижнів (рис. 2.17) **закон Гука** записують у вигляді:

$$\sigma = \varepsilon E, \quad (2.44)$$

де $\sigma = \frac{F}{S}$ – механічна напруга; S – площа перерізу стрижня,

$\varepsilon = \frac{(l - l_0)}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}$ – відносна деформація; E – модуль Юнга.

З формули (2.44) випливає, що модуль Юнга дорівнює механічній нарузі ($E = \sigma$), за якої відносна деформація $\varepsilon = 1$.

У разі деформації зсуву (рис. 2.18) шари тіла зміщуються паралельно площі зсуву і закон Гука записують у вигляді:

$$\sigma = \varphi G, \quad (2.45)$$

де σ – механічна напруга; $\varphi \approx \frac{BB^1}{AB}$ – відносна деформація;

G – модуль зсуву.

Збільшення довжини при деформації розтягування (стискування) супроводжується зменшенням площі перерізу. Зміна форми тіла при деформації характеризується коефіцієнтом Пуасона μ :

$$\mu = \frac{\Delta d}{d} : \frac{\Delta l}{l_0}, \quad (2.46)$$

де d – діаметр стрижня; Δd – зміна діаметра стрижня.

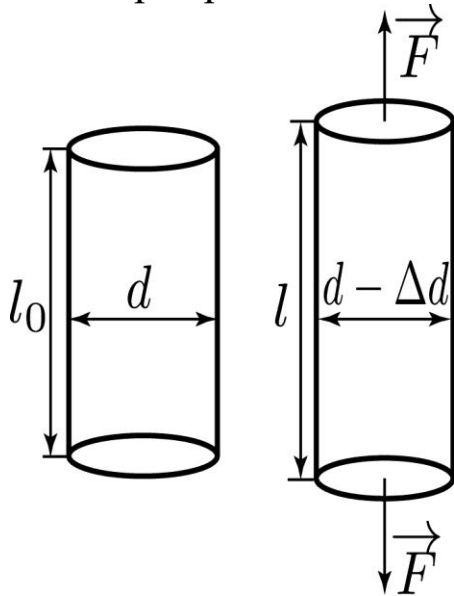


Рис. 2.17

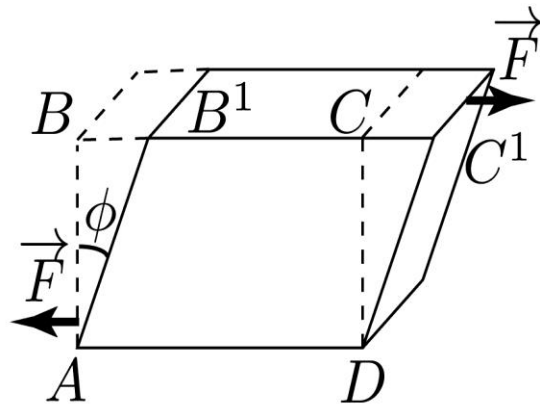


Рис. 2.18

Модулі Юнга, зсуву і коефіцієнт Пуасона пов'язані між собою співвідношенням:

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)}. \quad (2.47)$$

Деформації реальних твердих тіл підлягають закону Гука лише при малих напруженнях та невеликих деформаціях.

2.10. Пружні властивості рослин

Як фізичний об'єкт рослинна тканина – композиційний матеріал, утворений сполученням різнорідних компонентів. Відомо, що міцність і пружність рослин спричиняють так звані механічні тканини. Клітини механічної тканини товстостінні з нечисленними дрібними порами, щільно притиснуті між собою та з'єднані за допомогою перетинок. Можуть бути живі або мертві. Механічні тканини виникають з верхівкової меристеми, а також у результаті діяльності прокамбію і камбію. Вони присутні в усіх органах рослини, але найрозвиненіші по периферії стебла і в центральній частині кореня.

Розрізняють такі типи механічних тканин: *коленхіма* (первинна еластична опорна тканина дводольних рослин) та *склеренхіма* (міцна тканина з відмерлих клітин зі здерев'янілими, просоченими

лігнітом мертвими клітинами і рівномірно потовщеними оболонками, що забезпечує міцність органів і всієї рослини). Волокна склеренхіми утворюються майже в усіх органах рослин.

Клітини механічної тканини забезпечують міцність, твердість, пружність і гнучкість усіх органів рослини та формують скелет рослин. За пружністю при розтягуванні механічна тканина мало поступається каучуку, а за здатністю протистояти динамічним навантаженням без деформацій перевершує сталь. Її механічні властивості підвищуються зі збільшенням інтенсивності освітлення, вологості ґрунту, а також з пониженням вологості повітря.

Ступінь розвитку механічних тканин залежить від умов існування: вони майже відсутні у рослин вологих лісів, багатьох прибережних рослин, зате добре розвинені у більшості рослин посушливих місць існування.

Механічні тканини трав'янистих рослин утворюють сітку або каркас, частина їх тяжів проходять похило, мають перегородки у вузлах порожнистих стебел, що забезпечує їх особливу міцність і пружність.

Пружні властивості живих клітин зумовлені їх тургором (внутрішнім тиском). Клітини, наповнені водою, добре зберігають форму та розміри, стійкі проти зовнішніх механічних впливів за відсутності механічних тканин. У засушливих умовах, де тургор клітини залежить від зміни умов довкілля, органи рослин несуть велике механічне навантаження. Тому за таких умов виникла необхідність розвитку спеціальних механічних тканин.

Під впливом зовнішньої сили F рослинне стебло згинається. Зовнішні шари стебла розтягуються, внутрішні – стискаються, тоді як середні шари не відіграють ніякої ролі. Виникають пружні сили, що утворюють обертальний момент, який протидіє моменту сили F . Якщо вилучити центральну частину стебла, її опір на згин не зміниться. За результатами розрахунків, найбільший опір згину виявляють трубки, у яких відношення внутрішнього діаметра до зовнішнього становить 8:11. Саме таке співвідношення мають стебла більшості рослин. Яскравим представником рослин, позбавлених центральної частини стебла, є бамбук. Модуль Юнга тканини бамбука дорівнює $E = 1,96 \cdot 10^{10} \text{ Па}$, сталі – $E = 2,1 \cdot 10^{11} \text{ Па}$. У той же час відношення маси бамбука до його об'єму становить 600 кг/м^3 , тоді як для сталі це відношення дорівнює 7800 кг/м^3 .

Контрольні запитання

1. Що таке матеріальна точка, абсолютно тверде тіло?
2. Які засоби опису руху ви знаєте?
3. Що таке шлях, переміщення? Яка різниця між ними?
4. Що таке середня шляхова швидкість?
5. Що таке миттєва швидкість? Запишіть формулу.
6. Що таке прискорення? Запишіть формули середнього, миттєвого прискорення.
7. Що таке кутове переміщення, кутова швидкість? Як напрямлений вектор кутової швидкості?
8. Що таке кутове прискорення і як напрямлений його вектор?
9. Які існують зв'язки між поступальними й обертальними характеристиками руху?
10. Що таке нормальне, тангенціальне та повне прискорення? Як вони напрямлені? Запишіть формули.
11. Що таке інертність? Яка фізична величина є мірою інертності тіла?
12. Що таке сила і в яких одиницях її вимірюють?
13. Сформулюйте закони Ньютона. Запишіть формули.
14. Що таке імпульс тіла, імпульс сили?
15. Сформулюйте і запишіть формулу закону збереження імпульсу.
16. Що таке центр мас?
17. Що таке робота сили? Запишіть формулу роботи змінної сили.
18. Що таке потужність? Запишіть формулу.
19. У чому полягає механічний принцип відносності?
20. Чому закони динаміки однакові в інерціальних системах відліку?
21. Що таке енергія? Які види механічної енергії ви знаєте?
22. Сформулюйте і запишіть формулу теореми про зміну кінетичної енергії.
23. Що таке силове потенціальне поле?
24. Запишіть формулу закону всесвітнього тяжіння.
25. Запишіть формулу напруженості гравітаційного поля.
26. Чому дорівнює робота гравітаційного поля?
27. Чому дорівнює потенціальна енергія взаємодії двох тіл?
28. Чому дорівнює потенціальна енергія пружної деформації?
29. Сформулюйте закон збереження механічної енергії.

30. Який загальний зв'язок між силою і потенціальною енергією?
31. Які види сил у механіці ви знаєте?
32. Що таке сила тяжіння? Що таке вага тіла?
33. Сформулюйте і запишіть формулу закону Гука.
34. Який фізичний зміст модуля Юнга?
35. Що таке коефіцієнт Пуассона?
36. Який зв'язок між модулями зсуву, Юнга і коефіцієнтом Пуассона?

3. ДИНАМІКА ОБЕРТАЛЬНОГО РУХУ ТВЕРДОГО ТІЛА

3.1. Момент сили

Нехай у деякій точці i твердого тіла прикладено силу F у площині, що перпендикулярна до осі обертання (рис. 2.1).

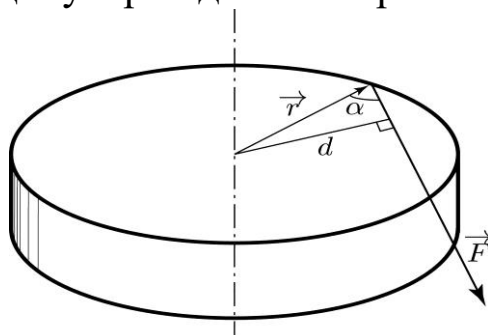


Рис. 3.1

Моментом сили F відносно осі обертання називається векторний добуток радіуса-вектора на силу:

$$\vec{M} = [\vec{r} \times \vec{F}]. \quad (3.1)$$

Розкриваючи формулу (2.1), можна записати модуль моменту сили:

$$M = Fr \sin \alpha = Fd, \quad (3.2)$$

де α – кут між векторами \vec{r} та \vec{F} ; $d = r \sin \alpha$ – плече сили.

Плече сили – це найкоротша відстань між віссю обертання і лінією дії сили. Якщо сила діє під кутом до площини обертання, то її можна розкласти на дві складові. Одна з них паралельна до осі обертання і діє лише на підшипники.

3.2. Момент інерції

Інертність тіла при обертальному русі залежить не тільки від маси, а й від її розподілу відносно осі обертання. Інертність тіла при обертанні характеризують моментом інерції відносно осі обертання.

Момент інерції J_i матеріальної точки i відносно осі обертання є скалярною фізичною величиною, яка дорівнює добутку маси на квадрат відстані її від осі:

$$J_i = m_i r_i^2. \quad (3.3)$$

Момент інерції твердого тіла i відносно осі обертання є сумою моментів інерції матеріальних точок, з яких складається тіло:

$$J_m = \sum_{i=1}^n m_i r_i^2. \quad (3.4)$$

Звичайно момент інерції суцільного тіла визначають інтегруванням:

$$J_m = \int r^2 dm. \quad (3.5)$$

Наприклад, визначимо момент інерції тонкого однорідного стрижня довжиною ℓ і масою m відносно осі, яка проходить через його середину (рис. 3.2). Виберемо маленьку ділянку стрижня довжиною $d\ell$ і масою dm , яка знаходиться на відстані x від осі обертання.

Цю ділянку можна розглядати як матеріальну точку, тоді для її моменту інерції отримаємо:

$$J_i = x^2 dm. \quad (3.6)$$

Маса елементарної ділянки дорівнює добутку лінійної густини на довжину ділянки: $dm = \frac{m}{\ell} dx$.

Тоді

$$dJ = \frac{m}{\ell} x^2 dx. \quad (3.7)$$

Для знаходження моменту інерції стрижня проінтегруємо формулу

(3.7) у межах від $-\frac{\ell}{2}$ до $\frac{\ell}{2}$:

$$J = \frac{m}{\ell} \int_{-\frac{\ell}{2}}^{\frac{\ell}{2}} x^2 dx = \frac{m}{3\ell} \left(\frac{\ell^3}{8} + \frac{\ell^3}{8} \right) = \frac{m\ell^2}{12}. \quad (3.8)$$

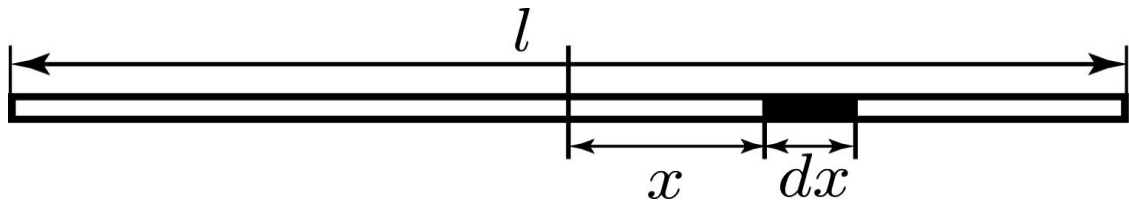


Рис. 3.2

Моменти інерції геометричних тіл масою m :

1) суцільний однорідний циліндр чи диск:

$$J = \frac{mR^2}{2}; \quad (3.9)$$

2) однорідна куля:

$$J = \frac{2}{5}mR^2; \quad (3.10)$$

3) прямокутний паралелепіпед (відносно осі, що проходить через його центр):

$$J = \frac{1}{12}m(a^2 + b^2). \quad (3.11)$$

При визначенні моменту інерції тіла, що не проходить через центр мас, можна користуватися теоремою Штейнера. Згідно з теоремою, момент інерції тіла відносно осі, що не проходить через центр мас тіла J , дорівнює моменту інерції тіла відносно осі, що проходить через його центр J_0 , плюс добуток маси на квадрат відстані b між паралельними осями:

$$J = J_0 + mb^2. \quad (3.12)$$

Одиниця моменту інерції – $(\text{кг} \cdot \text{м}^2)$.

3.3. Момент імпульсу

Моментом імпульсу L_i матеріальної точки i відносно осі обертання називають фізичну величину, яка дорівнює векторному добутку радіуса-вектора на імпульс:

$$\vec{L}_i = \left[\vec{r}_i \times m\vec{v}_i \right] = \left[\vec{r}_i \times \vec{p}_i \right]. \quad (3.13)$$

Розкриваючи формулу (3.13), можна записати модуль моменту імпульсу матеріальної точки:

$$L_i = R_i p = R_i m v = R_i m \omega R_i = J_i \omega, \quad (3.14)$$

де R_i – відстань до осі обертання; ω – кутова швидкість.

Момент імпульсу L тіла відносно осі обертання дорівнює сумі моментів імпульсів матеріальних точок, з яких складається тіло:

$$L = \sum_{i=1}^n J_i \omega = J \omega, \quad (3.15)$$

де J – момент інерції тіла відносно осі обертання.

У векторній формі момент імпульсу:

$$\vec{L} = J \vec{\omega}.$$

Таким чином, момент імпульсу дорівнює добутку моменту інерції тіла на кутову швидкість.

3.4. Робота і кінетична енергія при обертальному русі

Робота зовнішньої сили при обертанні тіла на досить малий кут $d\varphi$:

$$dA = \sum_{i=1}^n F_i ds_i \cos\varphi = \sum_{i=1}^n F_i R_i d\varphi = \sum_{i=1}^n M_i d\varphi = M d\varphi, \quad (3.16)$$

де $ds_i = R_i d\varphi$ – переміщення точки i ; R_i – радіус обертання

точки i (плече сили); $\sum_{i=1}^n F_i R_i = \sum_{i=1}^n M_i = M$ – момент зовнішніх сил.

Якщо положення радіуса-вектора змінилося від φ_1 до φ_2 , то роботу знаходять інтегруванням формули (3.16):

$$A = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} M d\varphi. \quad (3.17)$$

Кінетична енергія при обертанні тіла складається з кінетичної енергії окремих його точок:

$$W^k = \sum_{i=1}^n \frac{m_i v_i^2}{2} = \sum_{i=1}^n \frac{m_i R_i^2 \omega^2}{2} = \frac{\omega^2}{2} \sum_{i=1}^n m_i R_i^2 = \frac{J \omega^2}{2}. \quad (3.18)$$

Продиференціювавши формулу (3.18), одержимо елементарну зміну кінетичної енергії обертання:

$$dW^k = J \omega d\omega. \quad (3.19)$$

Якщо тіло одночасно перебуває в прямолінійному й обертальному русі, то кінетичну енергію визначають сумою енергій поступального та обертального рухів:

$$W^k = \frac{mv^2}{2} + \frac{j\omega^2}{2}. \quad (3.20)$$

3.5. Основний закон динаміки обертального руху

Прирівняємо зміну кінетичної енергії (3.19) до елементарної роботи зовнішніх сил при обертанні тіла (3.16):

$$J\omega d\omega = Md\varphi. \quad (3.21)$$

Поділимо праву і ліву частини формули на dt й отримаємо:

$$J\omega \frac{d\omega}{dt} = M \frac{d\varphi}{dt}. \quad (3.22)$$

Скоротивши праву і ліву частини формули на $\omega = \frac{d\varphi}{dt}$, отримаємо **основний закон динаміки обертального руху:**

$$J \frac{d\omega}{dt} = M. \quad (3.23)$$

Момент інерції тіла – величина стала, тому з формули (3.23) випливає:

$$\frac{d(J\vec{\omega})}{dt} = \frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M}. \quad (3.24)$$

У векторній формі формулу основного закону (напрямки кутової швидкості й моменту сили збігаються) записують так:

$$J \frac{d\vec{\omega}}{dt} = \vec{M}. \quad (3.25)$$

Основний закон динаміки обертального руху: добуток моменту інерції тіла на кутове прискорення дорівнює моменту зовнішніх сил.

Якщо при обертанні тіла на нього не діють зовнішні сили, то момент сили дорівнює нулю. Тоді отримаємо закон збереження моменту імпульсу: **момент імпульсу тіла залишається постійним, якщо момент зовнішніх сил, які діють на нього, дорівнює нулю:**

$$\vec{M} = \frac{d\vec{L}}{dt} = 0; \quad \vec{L} = j\vec{\omega} = const. \quad (3.26)$$

На тіло, що обертається, діє доцентрова сила. За третім законом Ньютона виникає відцентрова сила, яка діє на зв'язок. Для очищення повітря від пилу використовують циклонні сепаратори, які працюють за принципом виникнення центробіжного прискорення. Газовий потік у циклонному сепараторі рухається спірально-подібно вгору по трубі, тиск у центрі труби зменшується, тверді частинки накопичуються в центрі труби, рухаються вниз під дією сили тяжіння та осідають.

3.6. Вільні осі обертання. Гіроскопи

Якщо сили, що діють на вісь обертання, урівноважуються, а вісь проходить через центр мас, то її напрямок зберігається в просторі. Осі обертання, які зберігають свій напрямок у просторі, називають вільними осями інерції. У будь-якого тіла є три взаємно перпендикулярні (головні) осі інерції. Властивість тіл зберігати свою орієнтацію в просторі застосовують у гіроскопах. **Гіроскоп** – масивне симетричне тіло, що обертається навколо осі з великою швидкістю. Гіроскопи використовують у навігаційних приладах (гірокомпас, авіагоризонт), для підтримки заданого напрямку руху (автокуль на судні, автопілот), для орієнтації космічних кораблів.

3.7. Статика твердого тіла

Статика – розділ механіки, у якому вивчають умови рівноваги тіл під дією прикладених сил. **Рівновага** – це такий стан, за якого в інерціальній системі відліку тіло перебуває в стані спокою.

Умова рівноваги тіла, що не має осі обертання, впливає з першого закону Ньютона: **тіло перебуває в рівновазі (не переміщується в просторі), якщо векторна сума \vec{F} усіх сил, які діють на тіло, дорівнює нулю:**

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_N = 0. \quad (3.27)$$

Точка додатка результуючої сили \vec{F} є центром ваги тіла.

Умова рівноваги тіла, що має нерухому вісь обертання: **тіло, що має нерухому вісь обертання, перебуває в рівновазі (не обертається), якщо сума моментів сил дорівнює нулю:**

$$\sum_{i=1}^n \vec{M}_i = 0. \quad (3.28)$$

Контрольні запитання

1. Що називають моментом сили? Запишіть формулу.
2. Що називають моментом інерції?
3. Запишіть формули моментів інерції кулі, диска, стрижня відносно центру мас.
4. Сформулюйте і запишіть формулу теореми Штейнера про перенос осі інерції.
5. Запишіть формулу моменту інерції стрижня відносно осі, що проходить через його кінець.
6. Що називають моментом імпульсу?
7. Сформулюйте і запишіть формулу основного закону динаміки обертального руху.
8. Чому дорівнює робота і кінетична енергія обертального руху тіла?
9. Сформулюйте і запишіть формулу закону збереження моменту імпульсу.
10. Що називають вільною віссю обертання?
11. Що таке гіроскоп? Де використовують гіроскопічні прилади?
12. Що таке рівновага? Запишіть умови рівноваги.

4. КОЛИВАННЯ І ХВИЛІ

4.1. Коливальний рух. Гармонійні коливання

Коливальним називають будь-який рух, при якому значення фізичної величини повторюються. Коливальний рух – один з найпоширеніших рухів у природі. Коливаються молекули, атоми, маятники годинників, вода в морях і океанах, величина магнітного поля Землі, струни музичних інструментів і т.д. ***Коливальний рух, при якому значення фізичної величини повторюються через однакові проміжки часу, називають періодичним.*** Найцікавішим періодичним коливальним рухом є гармонійний.

Гармонійним називають періодичний коливальний рух, що відбувається за законом синуса або косинуса, наприклад, зсув від положення рівноваги в будь-який довільний момент часу дорівнює:

$$x = A \cos(\omega_0 t + \alpha), \quad (4.1)$$

де x – зсув від положення рівноваги; A – максимальний зсув (амплітуда); ω_0 – циклічна частота коливання; α – початкова фаза коливання; $(\omega_0 t + \alpha)$ – фаза коливання.

Розглянемо коливання проекцій радіуса-вектора точки, що рухається по колу радіуса A проти часової стрілки (рис.4.1).

У початковий момент часу $t = 0$ радіус-вектор становить з віссю OX кут α . За час t радіус-вектор описує кут $\omega_0 t$. **Фаза коливань $(\omega_0 t + \alpha)$ – кут між амплітудою і довільно обраним у просторі напрямком (віссю)**. Знайдемо період коливань.

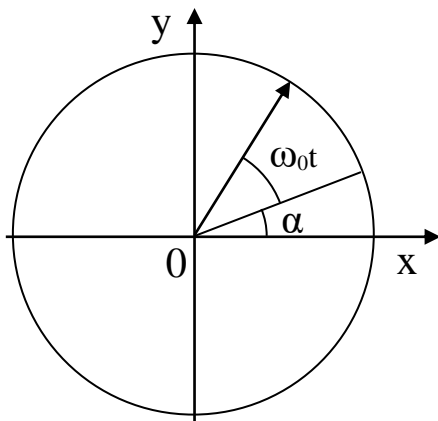


Рис. 4.1

Період коливань – це час одного повного коливання. Періодичність гармонійної функції 2π , тому період коливань знайдемо зі співвідношення:

$$\omega_0(t + T) + \alpha = \omega_0 t + \alpha + 2\pi.$$

Після скорочень одержимо формулу періоду будь-яких коливань:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0}. \quad (4.2)$$

Циклічна частота пов'язана з періодом і частотою ν такими співвідношеннями:

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu. \quad (4.3)$$

Фазу коливання можна записати так:

$$\omega_0 t = \frac{2\pi}{T} t. \quad (4.4)$$

З формули (4.4) видно, що **фаза коливання показує, яка частина періоду пройшла від початку коливання**. Визначимо швидкість і прискорення при гармонійному коливанні. Швидкість дорівнює похідній за часом від зсуву:

$$v = \frac{dx}{dt} = -A\omega_0 \sin(\omega_0 t + \alpha) = -v_{max} \sin(\omega_0 t + \alpha). \quad (4.5)$$

Прискорення дорівнює похідній за часом від швидкості:

$$a = \frac{dv}{dt} = -A\omega_0^2 \cos(\omega_0 t + \alpha) = -a_{\max} \cos(\omega_0 t + \alpha) = -\omega_0^2 x. \quad (4.6)$$

Нехай матеріальна точка рухається під дією пружної сили $F = -kx$. Запишемо рівняння руху:

$$ma = -kx, \quad (4.7)$$

де прискорення точки дорівнює:

$$a = \frac{dv}{dt} = -\frac{k}{m} x = -\omega_0^2 x, \quad (4.8)$$

де $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ – циклічна частота.

Будь-яку силу, прямо пропорційну величині зсуву і спрямовану в бік рівноваги, називають квазіпружною. Система, що рухається під дією квазіпружної сили, здійснює гармонійний коливальний рух.

4.2. Пружний, математичний і фізичний маятники

Пружний маятник – це тіло масою m , що підвішене на пружині й здійснює гармонійні коливання під дією пружної сили $F = -kx$, де k – коефіцієнт пружності (рис. 4.2).

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}, \quad (4.9)$$

де $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ – циклічна частота.

Підставивши значення ω_0 у формулу (12.9), отримаємо:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}. \quad (4.10)$$

Період коливань пружного маятника не залежить від амплітуди коливань.

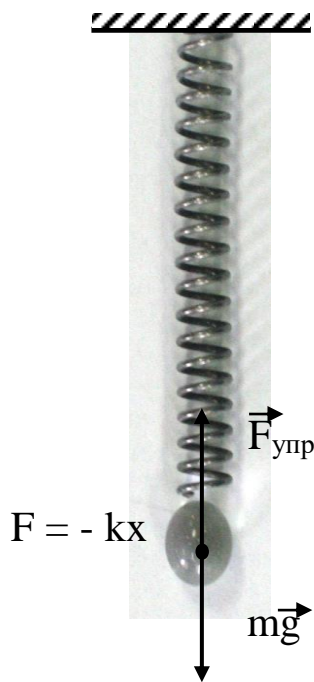


Рис. 4.2

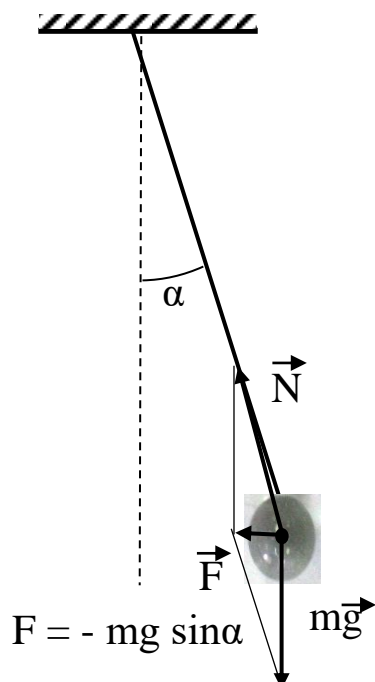


Рис. 4.3

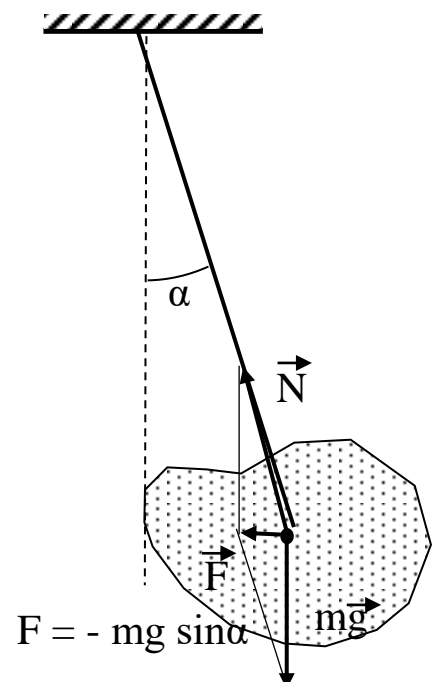


Рис. 4.4

Математичний маятник – це матеріальна точка, яка здійснює малі коливання на довгій, невагомій і нерозтяжній нитці (рис. 4.3) під дією сили ваги. Складова сили тяжіння, яка повертає маятник у положення рівноваги, пропорційна відхиленню від положення рівноваги і напрямлена у бік рівноваги ($F = -mg \sin \alpha$).

При малих кутах відхилення маятника обертаюча сила квазіпружна:

$$F = -mg \sin \alpha = -mg \frac{x}{\ell} = -kx, \quad (4.11)$$

де x – зміщення точки; ℓ – довжина нитки маятника.

Прискорення маятника дорівнює:

$$a = -\frac{x}{\ell} g = -\omega_0^2 x, \quad (4.12)$$

З формули (4.10) випливає:

$$\omega_0^2 = \frac{g}{\ell}. \quad (4.13)$$

Період коливань математичного маятника:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g}}. \quad (4.14)$$

Період коливань математичного маятника довжиною ℓ при малих кутах відхилення не залежить від амплітуди (4.14).

Фізичний маятник – будь-яке тверде тіло, що здійснює коливання під дією сили $F = -mg \sin \alpha$ навколо горизонтальної осі, що не проходить через центр його ваги (рис. 4.4).

Якщо маятник вивести з положення рівноваги, то на нього діятиме обертальний момент сили тяжіння:

$$M = -mg\ell \sin \alpha, \quad (4.15)$$

де ℓ – відстань від центра мас до точки підвішування.

При малих кутах відхилення $\sin \alpha \approx \alpha$ і обертальний момент:

$$M = -mg\ell \alpha. \quad (4.16)$$

Згідно з основним законом динаміки обертального руху, прискорення тіла:

$$\varepsilon = \frac{d^2 \alpha}{dt^2} = \frac{M}{J}, \quad (4.17)$$

де J – момент інерції тіла відносно осі коливання.

Рішення цього рівняння – гармонійна функція з періодом:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{J}{mg\ell}}. \quad (4.18)$$

Зведена довжина фізичного маятника, тобто довжина математичного маятника, який має однаковий період коливання з фізичним:

$$\ell_3 = \frac{J}{m\ell}. \quad (4.19)$$

Точку на фізичному маятнику, яка відповідає зведеній довжині, називають центром коливань.

За формулою (4.16) можна також отримати період коливань математичного маятника. Момент інерції матеріальної точки на відстані ℓ від осі коливань становить $J = m\ell^2$, тому період коливань математичного маятника:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{mg\ell}} = 2\pi \sqrt{\frac{m\ell^2}{mg\ell}} = 2\pi \sqrt{\frac{\ell}{g}}. \quad (4.20)$$

Кінетичну енергію будь-яких гармонійних коливань можна визначити за формулою:

$$W^{kin} = \frac{mv^2}{2} = \frac{m\omega_0^2 A^2 \sin^2(\omega_0 t + \varphi_0)}{2}. \quad (4.21)$$

Потенціальна енергія коливань:

$$W^{pot} = \frac{mv^2}{2} = \frac{m\omega_0^2 A^2 \cos^2(\omega_0 t + \varphi_0)}{2}. \quad (4.22)$$

Повна енергія гармонійних коливань пропорційна масі, квадрату амплітуди і квадрату частоти коливань:

$$W = \frac{mv^2}{2} + \frac{kx^2}{2} = \frac{mA^2\omega_0^2}{2}. \quad (4.23)$$

4.3. Додавання гармонійних коливань

1. **Складання коливань однакового напрямку.** Нехай точка одночасно бере участь у двох коливаннях уздовж осі x :

$$x_1 = A_1 \cos(\omega_0 t + \varphi_{01}), \quad x_2 = A_2 \cos(\omega_0 t + \varphi_{02}). \quad (4.22)$$

Додавання можна виконати за допомогою векторної діаграми, (рис. 4.5), де A_1, A_2 – положення векторів амплітуди в початковий момент часу; A – вектор амплітуди результуючого коливання. Результуючий рух є коливанням з коловою частотою ω_0 :

$$x = A \cos(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (4.23)$$

де амплітуда і початкова фаза результуючого коливання:

$$A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_{02} - \varphi_{01})}; \quad (4.24)$$

$$\operatorname{tg} \varphi_0 = \frac{A_y}{A_x} = \frac{A_1 \sin \varphi_{01} + A_2 \sin \varphi_{02}}{A_1 \cos \varphi_{01} + A_2 \cos \varphi_{02}}. \quad (4.25)$$

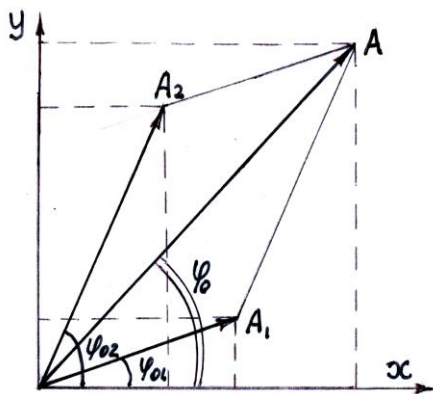


Рис. 4.5

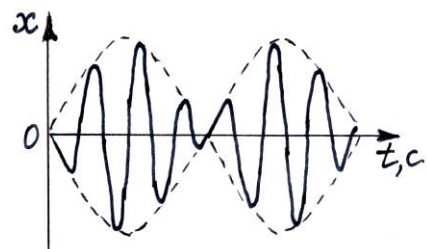


Рис. 4.6

Якщо частоти коливань, що складаються, мало відрізняються ($\omega_2 = \omega + \Delta\omega$), то рівняння коливань мають вигляд:

$$x_1 = A \cos \omega t, \quad x_2 = A \cos(\omega t + \Delta\omega)t. \quad (4.26)$$

Результуюче коливання подібне до гармонійного, але з повільно змінною амплітудою. Такі коливання мають назву **биття** (рис 4.6).

$$x = x_1 + x_2 = \left(2A \cos \frac{\Delta\omega}{2} t \right) \cos \omega t. \quad (4.27)$$

2. Складання взаємно перпендикулярних коливань. Нехай точка одночасно бере участь у коливаннях уздовж осі ОХ та ОУ, причому різниця фаз $\pi/2$:

$$x = A_1 \cos \omega_0 t, \quad y = A_2 \cos(\omega_0 t + \frac{\pi}{2}), \quad (4.28)$$

тоді після математичних перетворень отримаємо рівняння еліпса:

$$\frac{x^2}{A_1^2} + \frac{y^2}{A_2^2} = 1. \quad (4.29)$$

Таким чином, точка рухається по еліптичній траєкторії, а при $A_1 = A_2 = R$ – по колу. При складанні взаємно перпендикулярних коливань різних частот одержують траєкторії руху, які називаються фігурами Ліссажу.

4.4. Згасаючі та вимушені коливання. Резонанс

У реальних системах діють сили опору, тому коливання згасають. Другий закон Ньютона для системи, у якій діють сили тертя, має вигляд:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -kx + F_m, \quad (4.30)$$

де сила тертя пропорційна швидкості руху:

$$F_m = -r\nu = -r \frac{dx}{dt}, \quad (4.31)$$

де r – коефіцієнт тертя.

При малому терті розв'язання рівняння має вигляд:

$$x = A_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \alpha_0), \quad (4.32)$$

де $\beta = \frac{r}{m}$ – коефіцієнт згасання; $A = A_0 e^{-\beta t}$ – «амплітуда» згасаючих коливань.

Період згасаючих коливань залежить від коефіцієнта згасання:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}}. \quad (4.33)$$

Ступінь згасання характеризують логарифмічним декрементом згасання:

$$\delta = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)} = \ln \frac{A_0 e^{-\beta t}}{A_0 e^{-\beta(t+T)}} = \ln e^{\beta T} = \beta T. \quad (4.34)$$

Коефіцієнт згасання і логарифмічний декремент згасання зв'язані залежністю:

$$\delta = \beta T = \frac{T}{\tau} = \frac{1}{N}, \quad (4.35)$$

де $\tau = 1/\beta$ – проміжок часу, протягом якого амплітуда коливань зменшується в e разів (час релаксації); N – число коливань за час зменшення амплітуди в e разів.

Вимушені коливання виникають під дією зовнішньої періодичної змінної сили, наприклад, $F = F_0 \cos \omega t$. Рівняння руху за другим законом Ньютона має вигляд:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -kx - r \frac{dx}{dt} + F_0 \cos \omega t, \quad (4.36)$$

або

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = f_0 \cos \omega t, \quad (4.37)$$

де $f_0 = F_0/m$.

Розв'язання диференціального рівняння (4.37) має вигляд:

$$x = A \cos(\omega_0 t + \alpha_0); \quad (4.38)$$

$$A = \frac{f_0}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2}}; \quad \operatorname{tg} \varphi_0 = \frac{-2\beta \omega}{(\omega^2 - \omega_0^2)}. \quad (4.39)$$

Таким чином, якщо на будь-яку коливальну систему діяти періодичною силою з частотою ω , то вона буде поповнювати коливальну систему енергією і система буде коливатися із цією ж частотою.

Якщо частота коливань змущувальної сили близька до власної частоти коливань системи ω_0 , то спостерігається явище резонансу. **Резонанс – явище різкого (великого) збільшення амплітуди коливань при збігу частоти власних коливань із частотою змущувальної сили.** На рис. 4.7 показано графіки залежності амплітуди коливань від частоти за відсутності чи наявності опору.

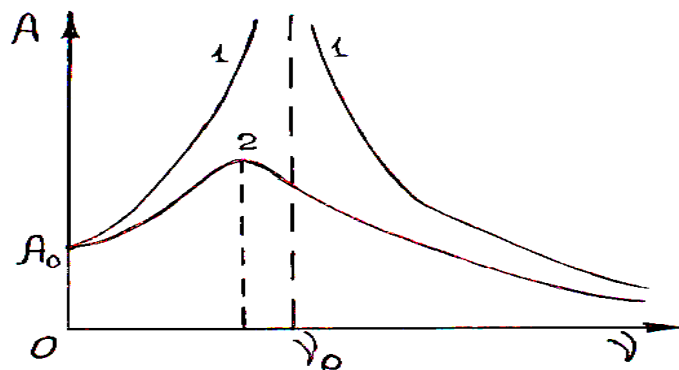


Рис. 4.7

Якщо сили тертя незначні, амплітуда коливань при резонансі зростає до дуже великої величини (крива 1). При великому опорі коливанням резонансна крива згладжується (крива 2), а резонансна частота зменшується. Резонансну частоту можна знайти за умови мінімуму знаменника (4.39). Явище резонансу широко використовують в промисловості (наприклад, для ущільнення бетонної суміші, ґрунту і т.п.).

4.5. Механічні хвилі в пружному середовищі

Якщо в ставок зі спокійною поверхнею води кинути невеликий камінь, то від точки його падіння будуть розходитися кола. Таке збурювання називають хвилею. Можна переконатися, що хоча вода і колишеться, вона не переміщається разом із хвилею. При проходженні хвилі частки води рухаються лише ввєрх і вниз. Приклади хвиль можемо спостерігати всюди. Спільним між ними є те, що в кожному випадку збурювання поширюється в деякому пружному середовищі, яке при цьому є нерухомим.

Хвиля – процес розповсюдження коливань (збурень) у пружному середовищі. На рис. 4.8 показано процес збудження хвилі, яка біжить уздовж струни музичного інструменту. Лівий кінець струни коливається вгору і вниз за гармонійним законом.

Хвилі, у яких коливання частинок середовища відбувається перпендикулярно до напрямку руху (поширення), називають поперечними. Вони являють собою опуклості й западини, що чергуються.

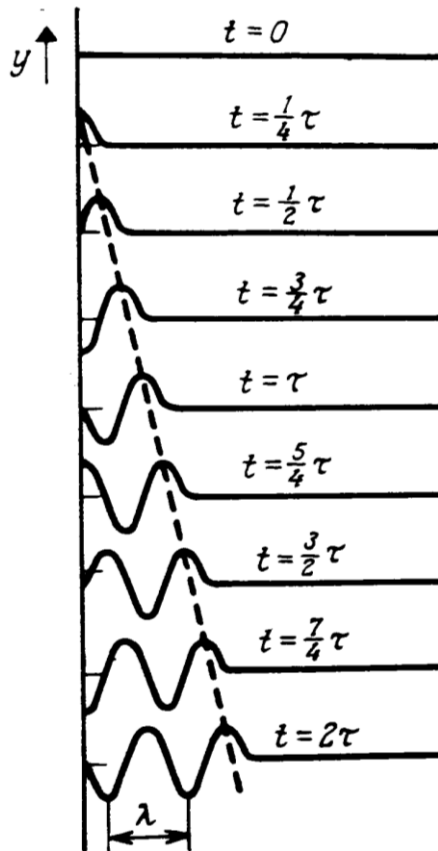


Рис. 4.8.

Поперечні хвилі виникають у твердих тілах і на поверхні рідини. Хвилі на поверхні рідини є гравітаційними. Якщо глибина рідини менша за довжину хвилі, виникають капілярні хвилі.

Хвилі, у яких коливання частинок середовища відбувається уздовж напрямку поширення хвилі, називають поздовжніми. Поздовжні хвилі можуть поширюватися у твердих, рідких, газоподібних середовищах, плазмі. Поздовжні хвилі пов'язані з об'ємною пружною деформацією, тому можуть виникати в будь-якому середовищі.

Процес поширення коливань у пружному середовищі відбувається не миттєво, а з деякою швидкістю. Швидкість хвилі залежить від пружних властивостей і щільності середовища. Відстань, на яку поширюються коливання за час одного періоду коливання, називають довжиною хвилі. На рис. 4.9 показано залежність зсуву частинок середовища від відстані до джерела коливань r для заданого моменту часу. Виразимо довжину хвилі через швидкість, період і частоту коливань:

$$\lambda = vT = \frac{v}{\nu}. \quad (4.40)$$

На рис 4.9 показано залежність зсуву частинки середовища x від часу для певної точки середовища.

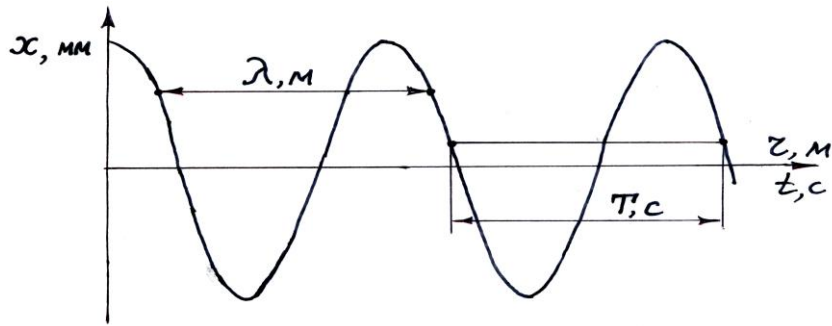


Рис. 4.9

З рис. 4.9 видно, що **довжина хвилі** – це відстань між точками середовища, що коливаються в однаковій фазі, а **період** – це час одного повного коливання.

Отримаємо рівняння плоскої монохроматичної хвилі. Нехай хвиля поширюється вздовж напрямку or без згасання. У точці $r = 0$ коливання описують рівнянням:

$$x = A \cos \omega t. \quad (4.41)$$

До будь-якої точки у напрямку or коливання прийде із запізненням:

$$x = A \cos \omega \left(t - \frac{r}{v} \right) = A \cos (\omega t - kr), \quad (4.42)$$

де $\omega \frac{r}{v} = \frac{2\pi r}{Tv} = \frac{2\pi}{\lambda} r = kr$, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – хвильове число.

Вираз (4.42) є рівнянням плоскої монохроматичної хвилі, яке дає змогу визначити зміщення кожної точки хвилі в будь-який момент часу. Множину точок середовища, що коливається в однаковій фазі, називають фронтом хвилі. Фронт хвилі знаходять, користуючись принципом Гюйгенса: **кожна точка середовища, до якої дійшла хвиля, стає джерелом вторинних сферичних хвиль. Обвідна поверхня вторинних хвиль створює положення нового фронту хвилі.** Швидкість руху фіксованої фази хвилі називають фазовою швидкістю. Зафіксуємо фазу хвилі:

$$(\omega t - kr) = const. \quad (4.43)$$

Продиференціювавши цю рівність, отримаємо:

$$\omega - \frac{kdr}{dt} = 0, \text{ звідки } v = \frac{dr}{dt} = \frac{\omega}{k}. \quad (4.44)$$

При переході хвиль з одного середовища в інше частота коливань не змінюється, а довжина хвилі та швидкість залежать від властивостей середовища. Швидкість позовжніх хвиль у твердих тілах

$$\sigma = \sqrt{E/\rho}, \quad (4.45)$$

де E – модуль пружності, або модуль Юнга; ρ – густина середовища.

Швидкість поперечних хвиль у твердих тілах

$$\sigma = \sqrt{G/\rho}, \quad (4.46)$$

де G – модуль зрушення.

Швидкість пружних (звукових) хвиль у газах або рідинах можна обчислити за формулою:

$$\sigma = \sqrt{\gamma \frac{p}{\rho}}, \quad (4.47)$$

де p – тиск у газі або рідині; γ – числовий коефіцієнт.

Для повітря коефіцієнт γ при кімнатній температурі дорівнює 1,4.

Швидкість звуку в повітрі залежить від температури:

при $0^{\circ}C - 332\text{м/с}$; $15^{\circ}C - 342\text{м/с}$; $100^{\circ}C - 386\text{м/с}$.

Швидкість звуку в різних середовищах при $t = 0^{\circ}C$ становить:

у кисні – 260м/с ; воді – 1450м/с ; склі – 5600м/с ; водні – 1280м/с ; сталі – 4900м/с .

Відзначимо, що повздовжні хвилі поширюються швидше ніж поперечні, тому що модуль Юнга більший за модуль зрушення. Цю різницю використовують для визначення відстані до епіцентру землетрусу, тому що при землетрусах від епіцентру поширюються хвилі деформації земної кори (сейсмічні хвилі).

4.6. Коливальні процеси в природі

У поведінці майже всіх видів тварин спостерігаються періодичні процеси (ритми). Часові масштаби біологічних ритмів можуть бути зовсім різними. Існують річні цикли, припливні цикли, цикли живлення, естральні та менструальні цикли. Ритми, періодичність яких дорівнює добі, називають циркадними (лат. *circa* – біля, *dies* – день). Поведінка багатьох птахів та ссавців значно залежить від цих ритмів – денні види вночі сплять, а при денному світлі активні; нічні види активні вночі, а вдень сплять; присмеркові види активні на світанку чи в надвечір'я. Для вивчення циркадних ритмів у лабораторних умовах часто використовують біг у колесі, який легко оцінити кількісно. Тварину поміщають усередину невеликого колеса,

закріпленого на горизонтальній осі. До колеса приєднано клітку – тварина може вільно входити в колесо й виходити з нього. Періодичний зовнішній стимул, з яким синхронізовано біологічний ритм, називають «датчиком часу» або «синхронізатором». Екзогенний ритм пов'язаний з якимось періодичним процесом, що відбувається в зовнішньому середовищі (чергування світла і темряви).

Для виявлення ендогенності ритму тварин звичайно утримують в умовах безперервного освітлення або постійної темряви, реєструючи при цьому їх активність чи інші ритми. У таких умовах у багатьох тварин спостерігають продовження звичайних для них періодичних коливань активності, хоча цикли можуть бути довшими чи коротшими за добу.

Альфред Джеймс Лотка та Віто Вольтерра, у 1925 й 1926 рр. запропонували рівняння, що описують коливання в системі хижак-жертва (рис. 4.10). Вона являє собою систему двох звичайних диференціальних рівнянь першого порядку, яка описує кінетику чисельності популяції з одним типом хижаків і одним типом жертв. Рівняння мають вигляд:

$$\frac{dx}{dt} = x(\alpha - \beta y); \quad \frac{dy}{dt} = -y(\gamma - \delta x),$$

де x – кількість жертв, наприклад, зайців, y – кількість хижаків, наприклад, вовків, $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ – певні параметри.

У рівняння входять такі процеси: розмноження жертв і їхня гибель у результаті поїдання хижаками, розмноження та вимирання хижаків. Вважають, що розмноження хижаків пропорційне кількості їжі, тобто кількості потенційних жертв у популяції. Характерною особливістю рівнянь є те, що їхнім розв'язанням є автоколивання.

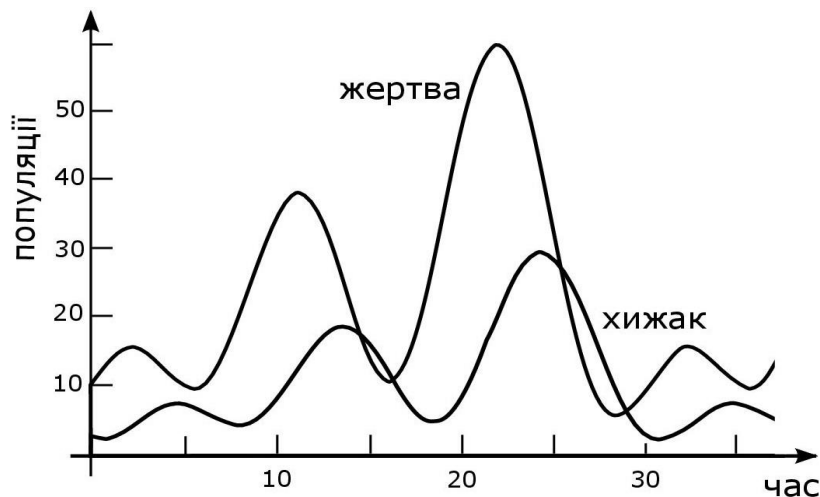


Рис. 4.10

Тривале сумісне існування хижаків і жертв викликає виникнення системи взаємодії, за якої ці групи стабільно зберігаються на загальній території. Порушення системи призводить до негативних екологічних наслідків. Наприклад, на коз і кроликів в Австралії, не нападають хижаки, що спричиняє руйнування природних екосистем.

Коливання кількості відбувається при утворенні колоній амеб *Dictyostelium discoideum*. Вийшовши зі спор, амеби ростуть і розмножуються як одноклітинні організми. Так триває до того часу, поки їжі (головним чином, бактерій) достатньо. Як тільки харчовий ресурс виснажується, амеби перестають розмножуватися і вступають у проміжну фазу, яка триває близько восьми годин. До кінця цього періоду амеби починають сповзатися до окремих клітин, що виконують функції центрів агрегації. Сформована колонія мігрує до того часу, поки не виявить ділянку середовища з умовами, придатними для утворення плодового тіла. Тоді маса клітин починає диференціюватися, утворюючи стебло, що несе на кінці міриади спор. Сповзання одноклітинних амеб у багатоклітинну колонію відбувається не монотонно, а періодично. Як показує кінозйомка процесу утворення колоній, існують концентричні хвилі амеб, що сходяться до центру з періодом у кілька хвилин. Це наочний приклад пристосування до навколишнього середовища. Популяція живе в деякій області доти, поки не вичерпує на-явні там ресурси. Потім вона зазнає метаморфози, у результаті якої отримує здатність пересуватися й освоювати інші області.

4.7. Звук та його характеристики

Звук являє собою механічні хвилі в пружних середовищах. Звукові хвилі в повітрі – поздовжні. Джерелом звуку завжди є тіла, які коливаються. Звук сприймає спеціальний орган чуття людини і тварин – вухо. Необхідна умова сприйняття звуку – пружне середовище між джерелом звуку й вухом. Інтервал звукових частот, які чує людина, 16 – 20 000 Гц.

Тембр звуку – спектр звукових коливань, що дає змогу розрізнити голоси людей, різні музичні інструменти і т.д. Звукові хвилі чинять на перешкоди (у т.ч. й на наші барабанні перетинки) певний тиск. Ми суб'єктивно сприймаємо зміну тиску звукових хвиль у ви-

гляді відчуття зміни *гучності звуку*. В акустиці під час оцінки інтенсивності звукових хвиль частіше застосовують інше поняття – сила звуку.

Силу звуку виміряють звуковою енергією, яка кожен секунду проходить через квадратний сантиметр умовної площі, розташованої перпендикулярно до напрямку розповсюдження хвилі. Звуковий тиск і сила звуку знаходяться в квадратичній залежності. Тобто сила звуку – це звуковий тиск у квадраті. Сила звуку описує енергетичні властивості самої хвилі:

$$I = \frac{W}{St}, \quad (4.48)$$

де I – сила звуку, $Вт/см^2$; W – енергія хвилі; S – площа; t – час, $с$.

Для того, щоб ми змогли почути звук, його сила повинна бути більшою від певного рівня (порога чутливості). Якщо сила звуку більша за певний рівень (больовий поріг), ми відчуваємо біль у вухах. Різницю між рівнями больового порога і порога чутливості називають динамічним діапазоном слуху. Сила звуку больового порога перевищує силу звуку порога чутності в тисячу разів. Лінійна зміна сили звуку (або звукового тиску) не сприймається нами як лінійна зміна гучності. Збільшення гучності у два рази відповідає збільшенню сили звуку у 100 разів (звукового тиску – у 10 разів), збільшення гучності в три рази відповідає збільшенню сили звуку вже в 10 000 разів (звукового тиску – у 100 разів). Через таку особливість нашого сприйняття зміну рівня (гучність) звуку прийнято вимірювати в логарифмічних одиницях – белах (B). Силу звуку в белах обчислюють за формулою:

$$N = \lg \frac{I_1}{I_2}, \quad (4.49)$$

де N – зміна рівня звуку; I_1 і I_2 – верхня і нижня межі сили звуку.

Десятикратне збільшення сили звуку відповідає одному белу, стократне – двом белах і т.д. Логарифмічна шкала дозволяє «стиснути» лінійну шкалу, зберігаючи при цьому достовірність. Зміна рівня звуку в один бел однаково відбиває зміну і сили звуку, і звукового тиску). Бел – це дуже велика величина для зміни рівня. Тому частіше застосовують децибел ($дБ$) – десятю частину бела. Зміну рівня в децибелах обчислюють за формулою:

$$N = 10 \lg \frac{I_1}{I_2} = 20 \lg \frac{P_1}{P_2}. \quad (4.50)$$

Мінімальний перепад рівня, який здатне сприйняти наше вухо, дорівнює одному децибелу, а динамічний діапазон слуху становить 120 дБ. Зміну рівня звуку звичайно оцінюють у децибелах щодо порога чутності. Коли говорять, що рівень звуку в колонках рівний ста децибелам, мають на увазі, що колонки працюють на рівні, що перевищує поріг чутності на 100 дБ. Високі й низькі звуки, що мають однаковий рівень, суб'єктивно сприймаються нами як звуки різної гучності. А значення рівня звуку і суб'єктивної гучності збігаються тільки на частоті 1000 Гц, тому ми набагато краще чуємо на середніх частотах.

4.8. Ефект Доплера

Австрійський фізик Крістіан Доплер відкрив явище зміни частоти хвилі, яку реєструє приймач, викликане переміщенням джерела або приймача. Доплер використав цей принцип в астрономії і провів паралель між акустичними й оптичними явищами. Він вважав, що всі зірки випромінюють біле світло, однак колір змінюється через їх рух до або від Землі. За Доплером зміна частоти звуку:

$$\nu = \nu_0 \frac{v}{v \pm u},$$

де ν – частота хвилі, яку фіксує нерухомий спостерігач, ν_0 – частота коливань у рухомому джерелі, v – швидкість розповсюдження хвилі, u – швидкість джерела. Знак залежить від напрямку руху джерела відносно спостерігача. Частота хвилі, яку фіксує спостерігач, зростає, якщо джерело рухається до нього, і зменшується, якщо джерело рухається від спостерігача.

4.8. Ультразвук та інфразвук

Ультразвуком називаються звукові коливання частотою більше 20 кГц. Ультразвук орган слуху людини не сприймає, однак він може спричиняти біль голови, загальну втому, розлади серцево-

судинної та нервової систем. За спектром ультразвук поділяють на: низькочастотний (коливання частотою від $1,5 \cdot 10^4$ до $1,0 \cdot 10^6$ Гц передаються людині повітряним чи контактним шляхом) та високочастотний (коливання частотою від $1,0 \cdot 10^5$ до $1,0 \cdot 10^9$ Гц передаються тільки контактним шляхом).

Ультразвук підпорядковується таким самим закономірностям, що й звукові хвилі, але через свою високу частоту має деякі особливості: мала довжина хвилі (менше 1,5 см) дає змогу отримувати скерований сфокусований пучок великої енергії; ультразвукові хвилі здатні створювати чітку акустичну тінь; проходячи через межу розділу двох середовищ, ультразвукові хвилі можуть відбиватись, заломлюватись або поглинатись; високочастотний ультразвук практично не розповсюджується у повітрі, бо звукова хвиля втрачає енергію пропорційно квадрату частоти коливань. У твердих і рідких середовищах ультразвук викликає ряд механічних і хімічних ефектів. Він активізує хімічні процеси. Зокрема, у середовищі рідина – газ виникає явище кавітації. У зоні розриву рідини внаслідок періодичного стиснення і розтягу утворюються бульбашки, наповнені паром рідини або газу. Розрив бульбашок супроводжується виділенням великої кількості енергії.

Для генерації ультразвуку застосовують джерела струму високої частоти і п'єзоелектричні або магнітострикційні перетворювачі. Низькочастотний ультразвук використовують для очищення повітря від пилу, деталей від мастил, окалини та інших забруднень, котлів і теплообмінних апаратів від накипу тощо. Високочастотним ультразвуком здійснюють дефектоскопію якості металевих і бетонних конструкцій та інших виробів, визначають дефекти зварних швів труб, котлів, будівельних конструкцій і т. ін.

Бактерицидну дію ультразвуку використовують у медичній та харчовій промисловості. При дії ультразвуку на біологічні об'єкти виникає локальний нагрів тканин, що збільшує інтенсивність обміну речовин. Однак більш інтенсивна й довготривала дія спричиняє перегрів біологічних структур та їх руйнування. У медицині ультразвук використовують для діагностики, терапевтичного та хірургічного лікування.

У тваринному світі ультразвук застосовують для *ехолокації* – способу, за допомогою якого положення об'єкта в просторі визначають за часом затримки повернень відбитої хвилі. Ехолокація розвинена в кажанів і дельфінів, землерийок, ряду видів ластоногих

(тюленів), птиць. Дельфіни і кажани випромінюють ультразвукові імпульси частотою до 130–200 кГц при тривалості сигналів від 0,2 до 4–5 мс. Птиці гуахаро і салангани використовують для орієнтації в темряві низькочастотні сигнали в 7–4 кГц. У дельфінів і кажанів, крім загальної орієнтації, ехолокація служить для визначення просторового положення, розмірів об'єкта, а у багатьох випадках – і розпізнавання місцезнаходження джерела звуку. У ссавців вона є важливим засобом пошуку і добування об'єктів живлення.

Інфразвуком називають звукові коливання із частотами, нижчими за 16 Гц. Хоча людина і не чує інфразвуку, він несприятливо впливає на її організм, у т.ч. й на орган слуху, знижуючи рівень його чутності практично на всьому частотному діапазоні звукових хвиль. Інфразвукові коливання людина сприймає як фізичне навантаження, що викликає передчасне втомлення, запаморочення, біль голови, порушення функції вестибулярного апарату, зниження гостроти зору та слуху, появу відчуття страху, загальну немічність. Інфразвук може також впливати і на психіку людини. Частота власних (резонансних) коливань тіла людини – 3–10 Гц, грудної клітини – 5–18 Гц, черевної порожнини – 3–4 Гц, що відповідає частоті інфразвуків. Несприятливий вплив інфразвуку суттєво залежить від рівня звукового тиску, тривалості впливу та діапазону частот. Найнебезпечнішою вважають частоту інфразвукових коливань близько 7 Гц, оскільки вона збігається з альфа-ритмом біострумів мозку.

Основними джерелами інфразвуку є тихохідні масивні установки та механізми (вентилятори, поршневі компресори, турбіни та ін.), що здійснюють обертові та зворотно-поступальні рухи з повторенням циклу менше ніж 20 разів за секунду. Інфразвук аеродинамічного походження виникає при турбулентних процесах у потоках газів чи рідин. Традиційні методи боротьби з шумом, засновані на звукоізоляції та звукопоглинанні, малоефективні щодо інфразвуку.

4.10. Фізичні механізми акусторецепції

Акусторецепція у ссавців

Слуховий аналізатор людини і високорозвинених тварин складається із зовнішнього, середнього і внутрішнього вух, зв'язаних із центральною слуховою нервовою системою.

Зовнішнє вухо складається з *вушної раковини* і *слухового проходу*. Вушна раковина направляє звукові коливання в слуховий прохід. Зовнішнє вухо підсилює найважливіші звукові частоти, що доцільно для комунікації живих істот між собою та їх виживання. У просторі, створеному слуховим проходом і середнім вухом, формується стояча хвиля. При рівності довжини цього простору чверті довжини хвилі звуку відбувається *резонанс*. Максимальна чутливість слухового аналізатора проявляється саме до резонансних частот.

Середнє вухо тварини, відокремлене від зовнішнього *барабанною перетинкою*, складається з *барабанної порожнини*, *слухових кісточок* (*молоточка*, *коваделка* і *стремінця*) та *слухової труби*. Функції середнього вуха обмежені передачею звукових коливань від зовнішнього середовища до ендолімфи, підсиленням слабких звукових сигналів і забезпеченням безпечного приймання інтенсивних сигналів.

Процес підсилення реалізується за рахунок збільшення тиску, що пов'язано зі зміною площі *барабанної перетинки* та *овального віконця*, яке зв'язане зі *стремінцем* і відокремлює середнє вухо від внутрішнього. Загальний рівень підсилення коливань середнім вухом становить близько 50.

Внутрішнє вухо складається з трьох спіральних каналів: *вестибулярного*, *середнього* і *барабанного*. Середній канал відокремлений від вестибулярного *мембраною Рейснера*, а від барабанного – *базиллярною мембраною*. На кінці барабанного каналу є *кругле віконце*, що виконує функції демпфера. Акусторецепторами є *волоскові клітини*, зв'язані з базиллярною мембраною і віконце оснащено *війками*. Базиллярна і покривна мембрани, волоскові клітини, з'єднані з *нервовими волокнами*, утворюють *кортієв орган*. Функції внутрішнього вуха полягають у частотному аналізі звукових сигналів. Згідно із сучасними уявленнями, коливання, збуджені *стремінцем* в *овальному віконці*, викликають хвильові рухи базиллярної мембрани у вигляді *біжучої хвилі*. На

(рис. 4.10) показано залежність розміщення максимуму біжучої хвилі від частоти звукового сигналу.

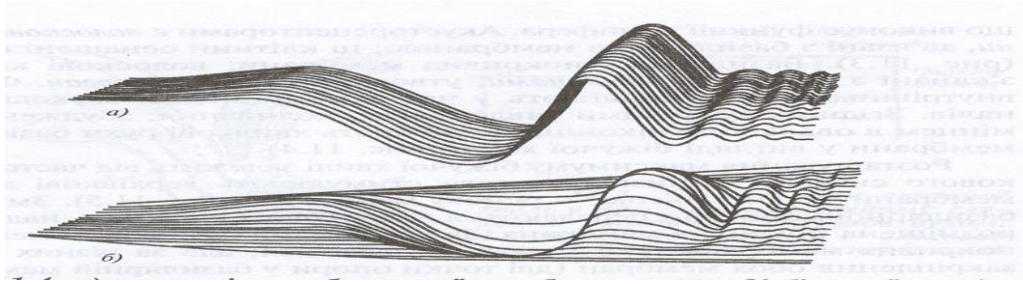


Рис. 4.10.

Розташування максимуму біжучої хвилі залежить від частоти звукового сигналу основи мембрани. Зміщення мембрани передаються волосковим клітинам, над якими розташована покривна мембрана. Унаслідок деформації базилярної мембрани покривна мембрана також починає рухатися, але за рахунок різних систем вигин війок збуджує зв'язані з волосковими клітинами волокна слухового нерва. Таким чином, звукова хвиля викликає коливання базилярної мембрани з амплітудою, локалізованою в певних ділянках мембрани. Локалізоване збудження волоскових клітин кортієвого органа відбувається залежно від частоти звукового сигналу.

Акусторецепція у птахів

Слух відіграє значну роль у повсякденному житті птахів. Він виконує важливі функції в процесі комунікації на довгих відстанях у місцях з обмеженою видимістю. Особливо цікавими є співочі птахи завдяки складності й значущості їхніх акустичних комунікаційних систем. Птахам, що ведуть нічний спосіб життя, притаманна надзвичайно висока слухова чутливість; водночас їх комунікаційний запас відносно примітивний.

Слуховий апарат птаха характеризується певними відмінностями від слухового аналізатора ссавців. Зовнішнє вухо має короткий, широкий і складний за рельєфом слуховий канал, який веде до барабанної перетинки. У багатьох птахів зовнішня частина слухового каналу оточена спеціалізованим пір'ям, що утворює своєрідну вирву, яка виконує функції ефективного звукового колектора. Особливо розвинені такі заглиблення параболічної форми у сов. Середнє вухо складається з довгої тонкої кістки, що з'єднує барабанну перетинку з овальним віконцем.

Акусторецепція у риб

Слухову функцію в риб несе орган рівноваги – лабіринт, зокрема його нижня частина. Основним акусторецептором риб є отолітовий орган, який складається з отолітів і волоскових клітин. Зву-

кові хвилі проходять через тіло риби з невеликим опором і викликають рух волоскових клітин. Через різницю рухів отолітів і волоскових клітин відбувається деформація клітин і в мозок надходить інформація щодо навколишньої звукової ситуації.

Розділяють два типи слухових аналізаторів у риби. За допомогою плавального міхура кісткові риби відчують гідростатичний тиск, підтримують рівновагу, утворюють звуки, дихають. Плавальний міхур спроможний розширюватися і скорочуватися у відповідь на звукові хвилі і передавати звукову інформацію через модифіковані хребці (чотири пари рухливо поєднаних кісточок) до внутрішнього вуха. Плавальний міхур виконує функцію своєрідного резонатора, що настроєний на звукові сигнали певної частоти і забезпечує їх підсилення. Риби, які не мають плавального міхура, використовують для перетворення звукових коливань у механічні повітряні порожнини, зв'язані з внутрішнім вухом. Важливу роль у сприйнятті звуку відіграє сейсмоденситивна система з точки зору аналізу акустичної ситуації поблизу джерела звуку і рецепції зміщення частинок води.

Акусторецепція у комах

Бджоли спроможні реагувати на коливання частинок повітря та субстрату, на якому вони знаходяться, завдяки чутливим органам, що розташовані в антенах та у верхніх частинах гомілок кінцівок. Слуховий аналізатор метелика-совки складається з розташованої на грудному боці тимпанальної мембрани, за якою розташована повітряна порожнина, що перетинається зв'язками. Одна з них містить нервові чутливі волокна, які реагують на механічні та акустичні стимули ультразвукової частоти, що дозволяє метелику сприймати опромінювання кажанами і різко кидатися донизу. У бражника слуховий аналізатор розташований на нижньогубних щупальцях, які мають повітряні порожнини в перших двох сегментах. Тимпанові мембрани мають сарана, цикади, золотоочки.

4.11. Акустичні фактори довкілля

Шум – це хаотична сукупність різних за силою і частотою звуків, що заважають сприйняттю корисних сигналів і негативно впливають на людину. За природою виникнення шуми поділяють

на механічний, аеродинамічний, гідравлічний, електромагнітний. За частотною характеристикою шуми поділяють на низькочастотний (<400 Гц), середньочастотний (400–1000 Гц), високочастотний (> 1000 Гц).

Якщо значення гучності перевищує 60–80 дБ, то такий шум може шкідливо впливати на здоров'я людини: підвищувати кров'яний тиск, викликати порушення ритму серця, створювати значне навантаження на нервову систему, впливати на психічний стан особи. Постійна дія сильного шуму може не лише негативно вплинути на слух, але й викликати інші шкідливі наслідки – дзвін у вухах, запаморочення, головний біль, підвищення втоми, зниження працездатності. Шум має акумулятивний ефект, тобто акустичні подразнення, накопичуючись в організмі людини, пригнічують нервову систему. Шум завдає шкоди здоров'ю людини, але й абсолютна тиша лякає і пригнічує. Для захисту від шуму використовують індивідуальні та колективні методи. Найефективнішими є заходи зниження шуму в джерелі його виникнення і на шляху його розповсюдження. Для екологічного моніторингу шуму використовують шумоміри.

Мікрофон – електроакустичний прилад, який перетворює звукові коливання струму. Робота мікрофона базується на тому, що тиск звукових коливань діє на тонку мембрану. У свою чергу коливання мембрани збуджують електричні коливання. Для кількісної оцінки шуму використовують усереднені параметри, які визначають на підставі статистичних законів. При нормуванні шуму звукового діапазону встановлюють гранично допустимі рівні (ГДР) у дев'яти октавних смугах із середньгеометричними значеннями частот 63, 125, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 8000 Гц (табл. 4.1).

Таблиця 4.1

Норми інтенсивності шуму для приміщень

Робоче місце	Рівень звуку, дБ	Рівні звукового тиску, дБ, в октавних смугах із середньгеометричними частотами								
		31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Творча діяльність, навчання	50	86	71	61	54	49	45	42	40	38
Робочі місця у виробничих приміщеннях	80	107	95	87	82	78	75	73	71	69

Контрольні запитання

1. Який рух називається коливальним?
2. Які умови необхідні для виникнення коливального руху?
3. Які коливання називають власними, вимушеними?
4. Що називають періодом, частотою, фазою коливань?
5. Який рух називають гармонійним коливанням?
6. Запишіть формулу зсуву при гармонійному коливанні.
7. Що таке математичний маятник?
8. Чому дорівнює період коливань математичного маятника?
9. Що таке фізичний маятник?
10. Запишіть рівняння згасаючих коливань.
11. Запишіть рівняння вимушених коливань.
12. Що таке логарифмічний коефіцієнт згасання?
13. У чому полягає явище резонансу?
14. Запишіть формули кінетичної та потенціальної енергії маятника.
15. Що таке механічна хвиля? Які види хвиль ви знаєте?
16. Яку хвилю називають поздовжньою, поперечною?
17. У яких середовищах поширюються поздовжні хвилі?
18. У яких середовищах поширюються поперечні хвилі?
19. Що називають довжиною хвилі? Запишіть формулу.
20. Від чого залежить швидкість поширення хвиль?
21. Напишіть формулу швидкості хвилі.
22. Що таке звук, інфразвук, ультразвук?
23. Від чого залежить швидкість звуку?
24. Що таке сила, гучність, тембр звуку?

5. МЕХАНІЧНІ ФАКТОРИ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА

5.1. Тиск. Атмосферний тиск

Відомо, що *тиск* p — це скалярна фізична величина, яка чисельно дорівнює нормальній силі F_n , що діє на одиницю площі. Одиницею вимірювання тиску в міжнародній системі одиниць СІ є паскаль ($Па$).

$$[p] = \frac{[F]}{[S]} = \frac{Н}{м^2} = Па.$$

Гідростатичний тиск стовпа рідини залежить від густини рідини ρ і висоти (або глибини) стовпа рідини h :

$$p = \frac{F_n}{S} = \frac{mg}{S} = \frac{\rho Vg}{S} = \frac{\rho Shg}{S} = \rho hg, \quad (5.1)$$

де F_n – сила нормального тиску (дорівнює вазі стовпа рідини), $m = \rho V$, об'єм рідини $V = Sh$.

Прийнято, що на рівні моря **нормальний атмосферний тиск** дорівнює $p_0 = 760$ мм рт. ст. (1 атм). Нормальний атмосферний тиск в міжнародній системі одиниць СІ дорівнює: $p_0 = 1,013 \cdot 10^5$ Па,

де тиск 1 мм рт.ст. = 133Па. При збільшенні висоти над рівнем моря тиск атмосфери зменшується від $1,013 \cdot 10^5$ Па до $2,8 \cdot 10^4$ Па на верхній межі тропосфери. Для вимірювання атмосферного тиску застосовують **барометри**.

У **барометрів з рідиною** вагу стовпчика рідини (води або ртуті) врівноважує тиск атмосфери. Зазвичай такі барометри являють собою скляну трубку, заповнену рідиною та запаяною з одного кінця. Трубку встановлюють вертикально вниз, відкритим кінцем у посудину з рідиною. Висота стовпчика рідини пропорційна тиску, тому його вимірюють у мм рт. ст.

У **барометрів без рідини** (барометрів-анероїдів) зміна атмосферного тиску змушує стискуватися або розширюватися гофровану металеву коробку (вакуумну камеру) з розрідженим повітрям усередині. Ці деформації за допомогою системи важелів і шарнірів передаються стрілці, що рухається по шкалі з позначками, що відповідають тиску. Завдяки портативності анероїди широко застосовують в експедиціях, а також як висотоміри (тоді шкалу анероїда градуують у метрах). Барометри також можуть використовувати як альтиметри для вимірювання висоти над рівнем моря.

Для безперервного запису зміни атмосферного тиску застосовують барографи. **Барограф** складається з приймальної частини, передавального механізму, з'єднаного з пером, та барабана зі стрічкою, який обертається за допомогою годинникового механізму.

5.2. Вітер. Рух повітряних потоків

Вітер – сукупність горизонтальних рухів повітря відносно земної поверхні. До його основних характеристик належать швидкість і напрям. Швидкість вітру визначають у метрах за секунду, кілометрах за годину. Існує також оцінка швидкості вітру в балах, так звана шкала Бофорта, за якою весь інтервал можливих швидкостей вітру поділено на 12 градацій. Розрізняють згладжену швидкість вітру за деякий невеликий проміжок часу і миттєву швидкість вітру, яка сильно коливається і може бути значно вищою або нижчою від згладженої швидкості. За допомогою приладів для вимірювання швидкості вітру, анемометрів, знаходять згладжену швидкість. Напрямок вітру визначають за стороною горизонту, звідки дме вітер, або кутом між напрямком вітру та меридіаном. Виникнення повітряних течій зумовлене дією чотирьох основних сил.

1. **Градiєнтна сила** виникає при різниці тиску у двох точках простору. Під дією різниці тиску по горизонталі (градієнтної сили) повітряні маси рухаються у напрямку градієнта тиску.

2. **Сила Коріоліса**. У 1838 р. Коріоліс довів, що при будь-якому русі відносно обертальної системи координат тіло зазнає додаткового обертального прискорення. Повітря, яке бере участь в обертальному русі Землі, намагається по інерції зберегти напрям руху, наданий йому первинною силою, тому повітряний потік відхиляється від свого первинного напрямку. Оскільки вітер – це рух повітря відносно Землі, то повітряний потік відхиляється від свого первинного напрямку. Сила Коріоліса направлена під прямим кутом до руху повітря, у Північній півкулі – управо, у Південній – уліво.

Для різних широт силу Коріоліса можна розрахувати за формулою:

$$F_k = 2v\omega \sin \varphi, \quad (4.2)$$

де v – швидкість вітру; ω – кутова швидкість Землі; φ – широта місцевості.

3. **Сила тертя** складається з сили зовнішнього тертя, пов'язаної з гальмуючою дією земної поверхні, та з сили внутрішнього тертя, що залежить від молекулярної і турбулентної в'язкості повітря. Вона направлена проти руху повітря і пропорційна його швидкості. Основна частина внутрішнього тертя зумовлена турбулентним переміщенням. Загальна сила тертя дорівнює

$$F_{\text{тер}} = -k\nu,$$

де k – коефіцієнт пропорційності, що залежить від шорсткості підстильної поверхні та інтенсивності турбулентності в повітрі.

4. **Відцентрова сила інерції** виникає під час криволінійного руху повітря і направлена по радіусу кривизни траєкторії руху від центра, тобто в сторону випуклості траєкторії. З розрахунку на одиницю маси її визначають за формулою:

$$F_m = \frac{\nu^2}{r}, \quad (4.3)$$

де ν – швидкість руху; r – радіус кривизни траєкторії.

Прилади, що визначають швидкість руху повітряних потоків, називають анемометрами. Принцип їх дії полягає в перетворенні енергії поступального руху повітря на механічне обертання різноманітних вітрових коліс.

Чашковий анемометр складається з напівсферичних чашок, що обертаються навколо осі, перпендикулярної до напрямку вітру. Для перетворення механічних обертань на сигнал, що інформує про швидкість вітру, використовують електричні генератори, оптико-електричні або ємнісні перетворювачі. Порогова чутливість чашечкового анемометра становить 0,90...2,24 м/с.

Пропелерний анемометр має три-чотирилопатевиий пропелер, вісь якого показує напрямок вітру. Гранична чутливість пропелерного анемометра становить 1,1 м/с. Перевагою анемометра такого типу, порівняно з чашковим, є його мала маса (пропелер може бути виготовлено з пластмаси), у три рази більша швидкість обертання і здатність вимірювати слабкі повітряні потоки.

Трубка Піто має вигляд циліндра з двома отворами, один з яких спрямовано в напрямку руху повітря і призначено для вимірювання загального тиску (статичного і динамічного), а інший – збоку, що дає змогу вимірювати тільки статичний тиск p . Різницю тисків вимірюють диференційним манометром.

Термоанемометр реєструє вплив повітряного потоку на температуру нагрітого провідника або тіла. Анемометри цього типу чутливі до зміни і швидкості вітру, і температури.

Робота **ультразвукового анемометра** ґрунтується на тому, що ультразвук поширюється швидше в напрямку дії вітру. Недоліком ультразвукових анемометрів є залежність швидкості поширення ультразвуку від температури, вологості, атмосферного тиску.

Доплерівський анемометр діє на основі ефекту Доплера: частота (довжина) розсіяної ультразвукової хвилі залежить від швидкості руху об'єкта. Доплерівські анемометри здатні вимірювати швидкість вітру на висоті до 1 км з точністю до 5 %.

Флюгери використовують для визначення напрямку вітру. Вони мають вигляд металевої пластини прямокутної форми, яка обертається навколо вертикальної осі. Інформацію про напрямок вітру в сучасних приладах передають за допомогою зміни положення реохорда, який спричиняє відповідну зміну електричного струму. Точність визначення напрямку вітру потенціометричною системою становить $\pm 3^0$.

Анеморумбометр застосовують для одночасного визначення швидкості й напрямку руху вітру. Кількість обертань повітряного гвинта цього приладу перетворюється на послідовність електричних імпульсів, частота яких пропорційна швидкості вітру, а фазовий зсув залежить від напрямку.

Вітроенергетика – галузь відновлюваної енергетики, що використовує енергію вітру, який є непрямою формою сонячної енергії. Енергетичний потенціал вітру пропорційний кубу його швидкості, але місця зі швидкістю вітру більшою ніж 5 м/с часто віддалені від місць споживання енергії. Крім того, енергію ураганів використати неможливо, до того ж вони є головними руйнівниками вітроустановок. Найсприятливішими регіонами для вітроустановок є степи, узбережжя морів та океанів, гірські райони.

За оцінками, площа, де середня швидкість вітру на висоті 8–10 м перевищує 5,1 м/с, охоплює 25 % поверхні Землі. З урахуванням економічних, технічних і екологічних обмежень можна побудувати ВЕС, які могли б виробляти 900 млрд кВт/год електроенергії за рік. Це становило б 3,5 % усієї електроенергії.

Останнім часом енергію вітру все ширше використовують для одержання електроенергії. Створюють вітряки великої потужності й установлюють на місцевості, де дмуть часті й сильні вітри. Кількість і якість таких двигунів зростає щорічно, налагоджено серійне виробництво.

Водночас вітроенергетичні електростанції мають такі недоліки:

потребують відведення великих земельних площ, значних затрат матеріалів; створюють високий рівень інфразвукового шуму; порушують природний спосіб життя птахів і тварин; велика кількість

ліній електропередач від численних вітрогенераторів; нерівномірна подача електроенергії.

ВЕС не можуть бути надійною основою великої енергетики. Вони доповнюють основні потужності, роблячи внесок у виробництво електроенергії.

5.3. Вплив вібрацій на живі організми. Землетруси

Вібрацією називають знакозмінні переміщення системи, за яких відбувається почергове зростання й зменшення в часі значень хоча б однієї координати. Викликані вібрацією напруження сприяють накопиченню пошкоджень у матеріалах, появі тріщин та руйнуванню.

Досить швидко руйнування об'єкта настає при вібраційних впливах при резонансі. Вібрація викликає порушення фізіологічного та функціонального станів людини. Стійкі шкідливі фізіологічні зміни називають вібраційною хворобою, симптомами якої є головний біль, погіршення зору, заніміння пальців рук, біль у кистях та передпліччі, виникнення галюцинацій, швидка втомлюваність, підвищення чутливості до охолодження, безсоння. При вібраційній хворобі виникають патологічні зміни спинного мозку, серцево-судинної системи, кісткових тканин та суглобів, змінюється капілярний кровообіг. Негативні відчуття від вібрації зникають під час прискорень, що становлять 5 % прискорення вільного падіння, тобто при $0,5 \text{ м/с}^2$. Особливо шкідливі вібрації з частотами, близькими до частот власних коливань тіла людини, більшість яких знаходиться в межах 6–30 Гц.

Землетруси – це короткотривалі, раптові підземні поштовхи, що супроводжуються коливаннями земної поверхні. Їх викликають внутрішні сили Землі, що спричиняють глибинні розриви земної кори. Упродовж кількох секунд товщі гірських порід зміщуються на кілька сантиметрів або навіть метрів у горизонтальному або вертикальному напрямках.

Осередком землетрусу називають місце в надрах, де виникає розрив і зміщення земної кори. Він розташований на глибині від кількох десятків до 700 км. Від осередку в усі боки поширюється потужна *сейсмічна хвиля*, яка передає коливання земної поверхні на великі відстані. Поширюються коливання дуже швидко – до 7 км/с.

Епіцентр землетрусу знаходиться над осередком на поверхні Землі. В епіцентрі сила поштовхів найсильніша. Якщо епіцентр землетрусу розташований на дні моря, то виникають *моретруси*. Тоді великі ділянки дна можуть швидко опуститися. Це спричиняє потужні велетенські хвилі – *цунамі*. Ознаки близького землетрусу: запах газу, де раніше цього не відзначалось; тривога птахів та домашніх тварин; іскри між близько розташованими електричними дротами; голубе освітлення внутрішньої поверхні будинків. До 30-х рр. ХХ ст. силу землетрусу вимірювали спричиненими збитками за так званою *шкалою Меркаллі*. Зараз для визначення магнітуди землетрусу використовують 9-бальну шкалу Ч. Ріхтера.

Магнітуда характеризує загальну енергію землетрусу і є логарифмом максимальної амплітуди зміщення ґрунту в мікронах, яку вимірюють за сейсмограмою на відстані 100 км від епіцентру. Один бал указує на слабкий підземний поштовх, кожний наступний позначає поштовх у 10 разів сильніший за попередній. Наприклад, 9-бальний землетрус у 10 разів сильніший за 8-бальний. У європейських країнах для визначення інтенсивності землетрусів використовують 12-бальну шкалу MSK-64. За цією шкалою землетруси поділяють на: слабкі (1 – 3 бали); помірні (4 бали); достатньо сильні (5 балів); дуже сильні (7 балів); руйнівні (8 балів); спустошувальні (9 балів); знищувальні (10 балів); катастрофічні (11 балів); дуже катастрофічні (12 балів).

Для реєстрації землетрусів використовують сейсмографи. Робота сейсмографа базується на принципі маятника. На рамі, що закріплена на ґрунті, на пружині вільно підвішено масивне тіло. Положення тіла практично не залежить від коливань рами. Під час струсу рами інерція маси змушує її гойдатися вгору-вниз, відстаючи від

коливань рами. Для вимірювання бічних коливань ґрунту масу прикріплюють до горизонтального маятника, який розгойдується на своїх петлях. У сучасних сейсмографах під час коливань маятника відносно корпусу приладу виникає електричний сигнал, який посилюється електронним способом у тисячі і навіть сотні тисяч разів; цей посилений сигнал приводить у дію перо самописця, у результаті чого виходить сейсмограма. Електричні сигнали з маятника сейсмографа можна також записувати на магнітну стрічку. Нині відсутні надійні методи прогнозування землетрусів та їх наслідків. Однак за зміною характерних властивостей ґрунту, незвичайною

поведінкою живих організмів перед землетрусом учені досить часто складають прогнози.

5.4. Аеротаксис комах. Феромони.

Таксиси – це направлені рухи всього організму в цілому, викликані зовнішнім стимулом. Такий рух може бути направлено у бік стимулу (позитивний таксис) або у протилежний бік (негативний таксис). Таксиси класифікують відповідно до природи стимулу (фото-, хемо-, баро-, реотаксиси).

Здатність комах принадуватись на світло, запах природних чи хімічних речовин (феромонів) використовують для їх обліку та відловлювання в різні пастки.

Розрізняють принади (атрактанти) харчові, коли комахи прилітають для додаткового живлення, і статеві (феромони), коли особини протилежної статі відшуковують за запахом свою пару. Частіше застосовують харчові принади для виявлення і спостереження за динамікою та інтенсивністю льоту метеликів совок, лучного метелика, горохової плодожерки та інших у ловильних коритцях 40×70×7 або 30×50×6 см.

Феромони – біологічно активні речовини (маркери) певного біологічного виду. Виділяються екзокринними залозами або клітинами. Є засобами сигналізації між особинами певної популяції. За дією феромони поділяють на два основних типи: *релізери* і *праймери*.

Релізери – тип феромонів, що спонукають особину до негайної дії. Їх використовують для привернення уваги статевих партнерів, сигналів небезпеки та інших дій, які потребують негайної реакції.

Праймери використовуються для формування певної поведінки особин і впливають на їх розвиток. Наприклад, спеціальний феромон, який виділяє бджола-матка, пригнічує статевий розвиток інших бджіл-самок, перетворюючи їх на робочих бджіл.

Розрізняють феромони:

- епагони – статеві (атрактанти, афродизіаки), які забезпечують зустріч і пізнання осіб різної статі й стимулюють статеву поведінку;
- одміхніони – мітки шляху, території, слідові феромони.
- торібони – феромони страху; феромони тривоги;
- гонофіони – феромони, що викликають зміну статі;

- гамофіони – феромони статевого дозрівання;
- етофіони – феромони поведінки.

Феромонні пастки почали застосовувати в багатьох країнах протягом останніх десятиріч, відтоді як було встановлено хімічну структуру атрактантів самок багатьох шкідників.

5.5. Фізичні механізми механорецепції

Існування живого організму неможливе без інформації, яка має поступати як із зовнішнього, так і з внутрішнього середовища. **Сенсорні системи (аналізатори)** перетворюють адекватні подразнення у нервові імпульси, що надходять до центральної нервової системи. На різних рівнях мозку ця інформація фільтрується, аналізується, впізнається та перетворюється на сенсорні відчуття. На основі сенсорної інформації відбувається організація роботи всіх внутрішніх органів людини, пристосування їх до умов існування. Розрізняють такі види сенсорних систем: зорову, слухову, нюхову, смакову, вестибулярну, сомато-вісцеральну (чутливість шкіри, внутрішніх органів).

Кожен аналізатор структурно складається з трьох частин:

1. Периферичний або рецепторний відділ.
2. Провідниковий відділ.
3. Мозковий відділ.

Рецептори являють собою спеціалізовані клітини або вільні нервові закінчення, розташовані на відкритих зонах шкіри, слизової оболонки в кожному внутрішньому органі й навіть у мозку. За місцем розміщення рецептори бувають контактні (тактильні) та дистантні (зорові, звукові, нюхові). За механізмом збудження розрізняють рецептори з первинним відчуттям (чутливість шкіри, нюх, смак) і вторинним (зорові, слухові, вестибулярні).

Рецептори мають таке призначення:

1. Виявлення та розпізнавання сигналів.
2. Сприйняття подразнення.
3. Перетворення сигналів на потенціал дії та кодування подразника.
4. Первинний аналіз отриманої інформації.
5. Відбір корисної інформації.

Провідниковий відділ виявляє та розпізнає сигнали. Одна частина інформації повністю виключається, інша – затримується на

деякий час за рахунок гальмування, решта надходить до кори мозку.

Мозковий відділ кожного аналізатора розміщений у корі. Він має ядерну та розсіяну частини. Ядерна частина аналізатора знаходиться у специфічному проєкційному полі кори, а розсіяна – у відповідній асоціативній ділянці. Мозковий відділ відповідає за декодування, детектування, упізнавання сигналів, побудову образу подразника та формування сенсорного відчуття.

Вестибулярний аналізатор виконує такі функції:

1. Забезпечує аналіз положення тіла в просторі під час руху.
2. Зберігає рівновагу під час руху.
3. Проводить аналіз частин тіла стосовно тулуба.
4. Визначає напрямок дії сили тяжіння.
5. Створює антигравітаційні сили організму.

Рецепторний відділ цього аналізатора знаходиться у внутрішньому вусі та представлений двома зонами: присінком та напівколовими каналами. Чутливі клітини присінка розміщені в маточці та мішечку. Ці клітини мають волоски, занурені в желатиноподібну масу з кристалами карбонату кальцію (статоліти або отоліти). Це отолітова мембрана. У разі вертикального положення тіла отоліти ніби сидять на волосках. Чутливі клітини обплетені нервовими закінченнями вестибулярного нерва.

Подразником для рецепторів присінка є прискорення руху та вільного падіння. При цьому зміщується отолітова мембрана, що призводить до натягування або деформації волосків чутливих клітин. Подразнення постійно викликає формування потоку імпульсів у відповідні центри, що забезпечує орієнтацію в просторі. Друга рецепторна зона – напівколові канали, заповнені ендолімфою (сагітальний, фронтальний та горизонтальний), розміщені перпендикулярно один до одного. У розширеній частині кожного каналу (ампули) є підвищення (гребінець), на якому розташовано рецепторні клітини. Їхні волоски також занурені в желеподібну масу, але без кристалів.

Подразником для цих рецепторів є прискорення обертальних рухів. У рецепторних клітинах виникає потенціал, який спричиняє виділення медіатора – ацетилхоліну, що викликає генерацію генераторного потенціалу в нервових закінченнях вестибулярного нерва, які обплітають рецепторні клітини.

5.6. Механіка рідинних і газових потоків

Особливістю рідини і газу є рухливість їхніх молекул. Унаслідок цього рідина і газ легко змінюють свою форму. У механіці рідину і газ розглядають як суцільне, неперервне середовище. Згідно з законом Паскаля, тиск у будь-якому місці нерухомої рідини або газу передається у всіх напрямках однаково. Тиск стовпа рідини (гідростатичний тиск) визначають тільки його висотою:

$$p = \rho gh, \quad (5.1)$$

де ρ – густина рідини; g – прискорення вільного падіння.

Сила тиску на нижні шари рідини більша, ніж на верхні, тому на тіло, занурене у рідину або газ, діє спрямована вгору сила, що дорівнює вазі витісненої тілом рідини або газу (закон Архімеда):

$$F_A = \rho g V, \quad (5.2)$$

де V – об'єм тіла.

5.7. Потік рідини. Рівняння нерозривності

Потік рідини (газу), у якому поле швидкостей з часом залишається незмінним, називають **стаціонарним**. Потік рідини графічно зображують лініями току (рис. 5.1). Густина ліній току пропорційна швидкості частинок в усіх місцях потоку, а їх швидкості дотичні до ліній току. Частину рідини або газу, обмежену лініями току, називають **трубкою току**. Існує два типи течії рідини або газу:

- 1) **ламінарна течія** – рідина (газ), розділена на шари (трубки потоку), які не перемішуються;
- 2) **турбулентна течія** – шари рідини (газу), що перемішуються.

Англійський вчений Рейнольдс (1842–1912 рр.) довів, що характер течії (перехід від ламінарної до турбулентної течії) залежить від безрозмірної величини (числа Рейнольдса):

$$R_e = \frac{\rho v D}{\eta}, \quad (5.3)$$

де ρ – густина рідини або газу; D – характерний лінійний розмір, наприклад, діаметр труби; v – середня по перетину швидкість; η – коефіцієнт динамічної в'язкості.

Для малих значень числа Рейнольдса ($R_e \leq 1000$) спостерігається ламінарна течія, при $1000 \leq R_e \leq 2000$ – перехід від ламінарної

до турбулентної течії, при $R_e \geq 2300$ – турбулентна течія. Англійський фізик Стокс (1819–1903 рр.) установив, що при малих швидкостях руху ($R_e \leq 1000$) сила опору пропорційна динамічній в'язкості й швидкості. Наприклад, сила опору рухові кулі в рідині становить:

$$F = 6\pi\eta r\nu, \quad (5.4)$$

де r – радіус кулі; ν – швидкість кулі.

Визначимо об'єм (потік) рідини (m^3/c), що перетинає деяку елементарну площадку dS за одну секунду:

$$d\Phi_\nu = \nu dS_0 = \nu dS \cos \alpha = \vec{\nu} \cdot d\vec{S}, \quad (5.5)$$

де ν – швидкість рідини; dS_0 – площадка, розташована нормально до швидкості; α – кут між вектором швидкості й нормаллю до площадки dS (рис. 5.1).

Повний потік знайдемо, проінтегрувавши елементарний потік по всій площі перерізу:

$$\Phi_\nu = \int_s \nu dS \cos \alpha = \int_s \vec{\nu} \cdot d\vec{S}. \quad (5.6)$$

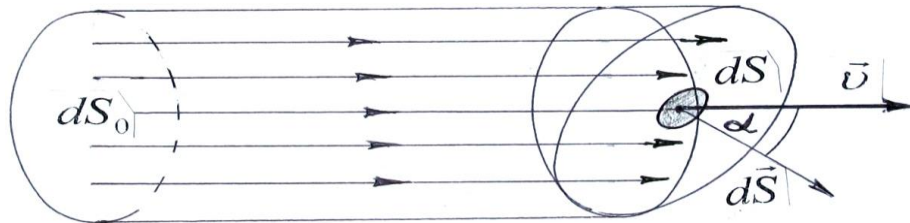


Рис. 5.1

Перенесення води в тканинах організму проходить за допомогою шляхом фільтрації. Швидкість фільтрації знаходять з рівняння Пуазейля, що описує ламінарну течію рідини за різниці тисків ($p_1 - p_2$) на одиницю довжини ℓ :

$$\Phi = \frac{dV}{dt} = \frac{\pi R^4 (p_1 - p_2)}{8\eta \ell}. \quad (5.7)$$

де R – радіус капіляра; η – коефіцієнт в'язкості рідини; ℓ – довжина капіляра; V – об'єм рідини.

За формулою (5.7), пропускаючи рідину або газ через капіляр відомого радіуса і вимірюючи перепад тиску і потік Φ , можна знайти в'язкість η .

При стаціонарній течії маса рідини або газу, що протікає через будь-який поперечний переріз потоку за одну секунду, однакова, тому:

$$\rho_1 S_1 v_1 = \rho_2 S_2 v_2, \quad (5.8)$$

де ρ – густина; v – швидкість течії.

У стаціонарному потоці змінами густини не тільки рідини, а й газу можна знехтувати, тому:

$$S_1 v_1 = S_2 v_2. \quad (5.9)$$

Рівняння (5.9) становить **теорему про нерозривність потоку рідини або газу**. З теореми випливає, що в тих місцях, де трубка шир-ша, швидкість потоку менша, і навпаки (рис. 5.2).

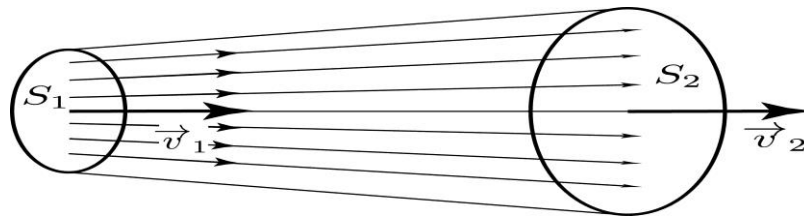


Рис. 5.2

5.8. Тиск у рідині та газі. Рівняння Бернуллі

Рідини і газу перебувають під тиском, який створює сила тяжіння або насоси. Для стаціонарного потоку ідеальної (нев'язкої і нестисливої) рідини виконується рівняння Бернуллі (1700–1782):

$$\frac{\rho v^2}{2} + \rho gh + p = const, \quad (5.10)$$

де $\frac{\rho v^2}{2} = p_d$ – динамічний тиск; $\rho gh = p_s$ – гідростатичний тиск; p – статичний тиск.

Якщо потік горизонтальний, то рівняння набуває вигляду:

$$\frac{\rho_1 v_1^2}{2} + p_1 = \frac{\rho_2 v_2^2}{2} + p_2. \quad (5.11)$$

З формули (5.11) видно, що там, де швидкість більша, статичний тиск p менший і навпаки. Зниження тиску при збільшенні швидкості використовують в інжекторах, пульверизаторах, масляних дифузійних вакуумних насосах тощо.

Для вимірювання швидкості рідини чи газу використовують **трубку Піто**. Цей прилад має дві трубки (одну з отвором, паралельним до потоку, і другу з отвором, перпендикулярним до потоку), які з'єднані з диференціальним манометром (рис. 5.3). З рівняння

Бернуллі впливає формула для визначення швидкості рідини або газу:

$$\frac{\rho v^2}{2} = p_1 - p_2; \quad v = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}}, \quad (5.12)$$

де ρ – густина рідини або газу; $(p_1 - p_2)$ – різниця статичних тисків, яку вимірюють манометром або за різницею висот $(p_1 - p_2) = \rho gh$.

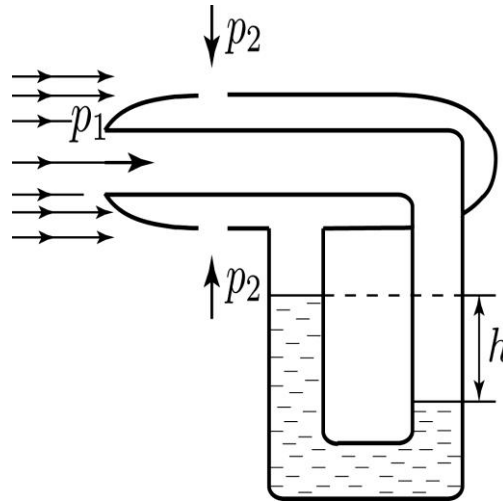


Рис. 5.3

Аерація ґрунту. Нехай вітер дме перпендикулярно до напрямку борозен зораного поля. Наявність борозен впливає на характер повітряного потоку: приземний шар повітря змінного перетину обмежений поверхнею землі та найближчою горизонтальною поверхнею, що утворена незбуреним потоком (рис. 5.4). Відповідно до рівняння (5.10) і (5.11) тиск повітря над борознами буде більший, ніж над горбиками.

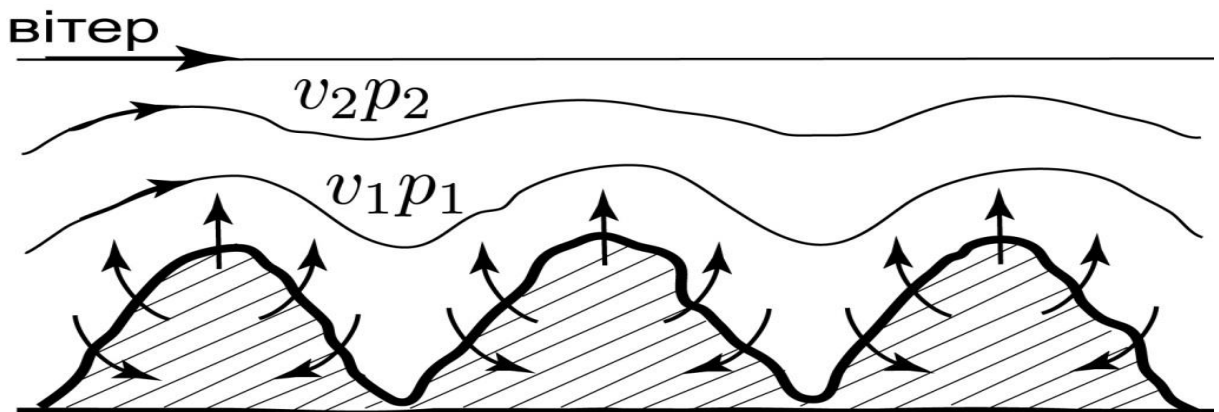


Рис. 5.4

У поверхневому шарі ґрунту виникає рух повітря, спрямований від основ борозен до вершин горбиків. Аерація збагачує ґрунт киснем, а приземне повітря – вуглекислотою, сприяючи росту рослин. При великій швидкості вітру рух повітря в ґрунті спричиняє руйнування частинок і сприяє створенню дрібногрудкуватої структури ґрунту.

Закон Дарсі. При фільтрації рідини через пористе середовище (вода в ґрунті) діє закон Дарсі: об'ємна витрата рідини Q ($\text{м}^3/\text{с}$) через пористе середовище прямо пропорційна коефіцієнту проникності пористого середовища k (м^2), перепаду тиску Δp (Па) по довжині $\Delta \ell$ і на площі фільтрації S (м^2).

$$Q = kS \frac{\Delta p}{\mu \Delta \ell}, \quad (5.13)$$

де η – коефіцієнт динамічної в'язкості, Пас.

Контрольні запитання

1. Що таке тиск? В яких одиницях вимірюється?
2. Що таке барометр? Які види барометрів ви знаєте?
3. Що таке вітер?
4. Що таке вібрація?
5. Сформулюйте і запишіть формулу закону Паскаля.
6. Сформулюйте і запишіть формулу закону Архімеда.
7. Які види течій ви знаєте?
8. Який фізичний зміст числа Рейнольда?
9. Запишіть формулу Стокса.
10. Як визначити потік рідини?
11. Сформулюйте теорему про неперервність потоку.
12. Запишіть формулу Пуазейля.
13. Що таке трубка Піто?
14. Запишіть формулу Бернуллі.
15. Дайте визначення статичного, гідростатичного, динамічного тиску.
16. Поясніть процес аерації ґрунту.
17. Запишіть закон Дарсі.

6. ОСНОВИ МОЛЕКУЛЯРНОЇ ФІЗИКИ

6.1. Основні положення молекулярно-кінетичної теорії речовини

Молекулярна фізика – це розділ фізики, у якому вивчають властивості речовини з урахуванням характеристик дрібних частинок (атомів і молекул).

Молекулярно-кінетична теорія (МКТ) – це наукова теорія, що пояснює фізичні властивості речовини на основі молекулярної будови, взаємодії та руху дрібних частинок (молекул і атомів).

Основні положення молекулярно-кінетичної теорії:

- усі тіла складаються з дрібних частинок (молекул і атомів);
- частинки перебувають у безперервному хаотичному русі;
- між частинками будь-якої речовини діють сили взаємодії.

Атом – найменша частинка хімічного елемента. **Молекулою** називають найменшу стійку частинку речовини, що має її основні хімічні властивості. Молекула може складатися з одного або декількох атомів.

Кожна речовина характеризується молярною масою M , що визначають за допомогою таблиці хімічних елементів Менделєєва.

Наприклад:

Fe : $M = 64 \cdot 10^{-3}$ кг/моль; CO_2 : $M = 44 \cdot 10^{-3}$ кг/моль;

N_2 : $M = 28 \cdot 10^{-3}$ кг/моль; H_2O : $M = 18 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

Одиницею кількості речовини є моль.

Моль – це кількість однорідної речовини, що містить стільки ж атомів або молекул, скільки має атомів 0,012 кг вуглецю. Число атомів або молекул, що містить один моль речовини, називають числом Авогадро $N_A = 6,023 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹.

Кількість речовини (число молей ν) можна визначити за формулою:

$$\nu = \frac{m}{M} = \frac{V}{V_\mu} = \frac{N}{N_A}, \quad (6.1)$$

де m , V – маса та об'єм речовини; V_μ – молярний об'єм; M – молярна маса; N – кількість атомів або молекул; N_A – число Авогадро.

Експериментальним доказом існування молекул рідини або газу та хаотичного теплового руху є броунівський рух.

Броунівський рух – це безперервний хаотичний рух твердих частинок під дією ударів молекул. Ще одним доказом руху молекул є дифузія.

Дифузія – це фізичне явище, при якому молекули (або атоми) однієї речовини проходять між молекулами (або атомами) іншої речовини і навпаки (взаємна дифузія). Дифузію спостерігають в газоподібних, рідких і твердих речовинах. Швидкість процесу дифузії зростає з підвищенням температури.

За молекулами й атомами можна безпосередньо спостерігати в електронному та іонному мікроскопах. Середній розмір атомів (діаметр) дуже малий: $\langle d \rangle \approx 3 \cdot 10^{-10}$ м. Сили $F(r)$ взаємодії між частинками виявляються на дуже малих r відстанях порівняно з лінійними розмірами атомів. Міжмолекулярні сили короткодійчі – вони діють між сусідніми молекулами і швидко зменшуються зі збільшенням відстані між молекулами.

Рух молекул газів, рідин і твердих тіл

У газах середня відстань між молекулами набагато більша, ніж розміри молекул газу. Взаємного притягання між молекулами газу фактично немає. Молекули газу рухаються рівномірно і прямолінійно від зіткнення до зіткнення з іншими молекулами. Під час удару змінюється напрямок і величина швидкості. Якщо молекули газу складаються з декількох атомів, то при зіткненні вони набувають ще й обертального руху. Таким чином, ***тепловий рух молекул газу поступальний і обертальний.***

У рідинах молекули якийсь час перебувають у рівновазі, де вони коливаються, а потім переходять у нове положення рівноваги і т.д. Отже, тепловий рух молекул рідин в основному ***коливальний, а також поступальний.***

У твердих тілах тепловий рух молекул – ***коливальний***, але інколи молекули у твердих тілах можуть переходити з одного положення рівноваги в інше.

Властивості великої кількості молекул відрізняються від властивостей окремих молекул, тому при дослідженні таких систем використовують молекулярно-кінетичний (статистичний) і термодинамічний методи.

6.2. Ідеальний газ. Основне рівняння МКТ ідеального газу

Молекули реального газу мають кінетичну і потенціальну енергію. У деяких випадках потенціальною енергією молекул зневажають.

Ідеальний газ – модель газу, у якій не враховують розміри молекул та їхню взаємодію на відстані. Реальні гази при не дуже низьких температурах і малому тиску за своїми властивостями близькі до ідеального газу.

Молекули газу рухаються хаотично. Зіштовхуючись зі стінками посудини, молекули газу створюють тиск p :

$$p = \frac{F}{S}, \quad (6.2)$$

де F – сумарна сила ударів усіх молекул об стінки посудини;
 S – площа поверхні посудини (балона).

З основних положень *МКТ* можна одержати основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії ідеального газу, що пов'язує параметри стану термодинамічної системи (p, V) з характеристиками молекул:

$$p = \frac{1}{3} \frac{N}{V} m_0 v_{кв}^2, \quad (6.3)$$

де N – число молекул в об'ємі V ; m_0 – маса молекули; $v_{кв}$ – середня квадратична швидкість молекул. У рівнянні (4.3) відношення $\frac{N}{V} = n$ – концентрація молекул. З огляду на те, що середня кінетич-

на енергія молекул газу $E_{кин} = \frac{m_0 v^2}{2}$, з рівняння (6.3) одержимо формулу тиску ідеального газу:

$$p = \frac{2}{3} n E_k, \quad (6.4)$$

де E_k – середня кінетична енергія молекул газу.

Експерименти показали, що в стані термодинамічної (теплової) рівноваги для будь-яких газів відношення $\frac{pV}{N} = const$, тобто воно характеризує стан теплової (термодинамічної) рівноваги. Розмірність цієї величини – джоуль. Тоді:

$$\frac{pV}{N} = \frac{1}{3} m_0 v_{кв}^2. \quad (6.5)$$

Введемо новий параметр T – абсолютну температуру, тоді:

$$\frac{2}{3}nE_k = kT, \quad (6.6)$$

де $kT = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ ДжК}^{-1}$ – стала Больцмана.

З формули (6.6) видно, що середня кінетична енергія одноатомних молекул газу:

$$E_k = \frac{m v_{кв}^2}{2} = \frac{3}{2}kT. \quad (6.7)$$

З формули (6.7) одержимо формулу для середньої квадратичної швидкості поступального руху молекул ідеального газу:

$$v_{кв} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}, \quad (6.8)$$

де $R = kN_A$ – універсальна газова стала; m_0 – маса молекули;

M – молярна маса; $v_{кв}$ – середня квадратична швидкість:

$$v_{кв} = \sqrt{\frac{v_1^2 + v_2^2 + v_3^2 + \dots + v_N^2}{N}}.$$

Фізичні процеси, які відбуваються при нагріванні або охолодженні тіл, зміні їхнього агрегатного стану, називають *тепловими явищами*. Теплова (термодинамічна) рівновага системи характеризується *температурою*.

Температура – фізичний параметр, який характеризує тіла в стані теплової рівноваги. **Температура – це міра середньої кінетичної енергії поступального руху молекул** (або атомів) макроскопічної системи (6.7) у стані теплової рівноваги. У стані теплової рівноваги температура всіх тіл однакова.

Для вимірювання температури застосовують прилади, що називаються термометрами. У побуті для вимірювання температури використовують шкалу Цельсія – міжнародну практичну шкалу. Сотя частина шкали Цельсія між температурою танення льоду (0°C) і кипіння води (100°C) називається *градусом*. Порівнюючи температурні шкали Цельсія і Кельвіна, одержимо формулу:

$$T = t^\circ\text{C} + 273. \quad (6.9)$$

де T – температура в градусах Кельвіна; $t^\circ\text{C}$ – температура в градусах Цельсія. На шкалі Кельвіна всі температури позитивні, тому що відлік температур ведеться від нуля – 0 К .

6.3. Ізопроееси в газах

Термодинамічною системою називають будь-яку фізичну систему, яка складається з великого числа атомів і молекул, що здійснюють неупорядкований тепловий рух і, взаємодіючи між собою, обмінюються енергією. Будь-яка зміна в термодинамічній системі, пов'язана зі зміною хоча б одного з термодинамічних параметрів (p , V , T) стану системи, називається **термодинамічним процесом**.

Ізопроеесами у газах називають термодинамічні процеси, які відбуваються при постійному значенні одного з параметрів стану системи (p , V , T).

Рівноважними (квазістатичними) називаються такі процеси, під час яких зміна стану системи відбувається дуже повільно і система проходить неперервний ряд нескінченно близьких рівноважних термодинамічних станів, тобто час переходу значно більший за час релаксації системи.

Нестатичними називають процеси, при яких час переходу значно менший за час релаксації системи. Розглянемо закони ідеального газу, які було отримано дослідним шляхом.

Ізотермічний процес – це процес, що відбувається при постійній температурі $T = \text{const}$ (рис. 6.2). Бойль і Маріотт (Р. Бойль (1627–1691), Маріотт (1620–1684)) довели, що **для певної маси газу (m) при постійній температурі (T) добуток тиску на об'єм є сталою величиною** (рис. 6.2).

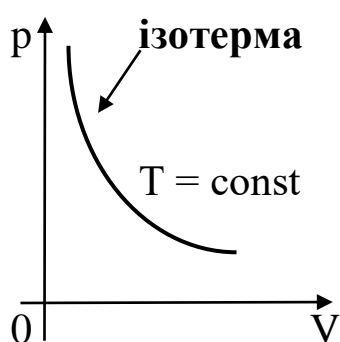


Рис. 6.2

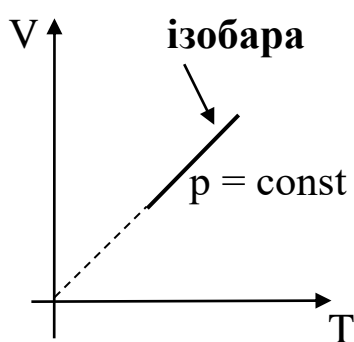


Рис. 6.3

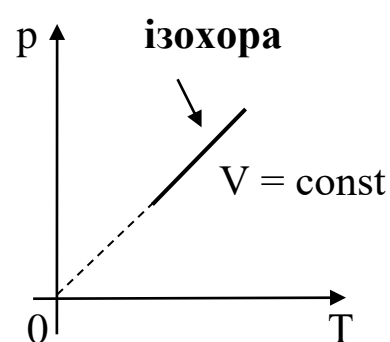


Рис. 6.4

У цьому процесі параметри p і V змінюються обернено пропорційно:

$$pV = \text{const}. \quad (6.10)$$

Ізобаричний процес у газах – це процес, що відбувається при постійному тиску ($p = \text{const}$) (рис. 6.3). У цьому процесі параметри V і T змінюються прямо пропорційно.

Гей-Люссак довів, що в ізобарному процесі ($p = \text{const}$) *для певної маси газу при постійному тиску об'єм газу змінюється пропорційно до температури:*

$$V = V_0(1 + \alpha t^{\circ}\text{C}), \quad (6.11)$$

де V_0 – об'єм газу при нормальній температурі; α – температурний коефіцієнт. Виявилось, що для всіх газів він дорівнює $\frac{1}{273} \text{град}^{-1}$.

У 1848 р. Уільям Томсон (1824–1907) увів поняття абсолютної температури $TK = 273 + t^{\circ}\text{C}$; $T_0 = 273K$:

$$V = V_0 \left(\frac{273 + t^{\circ}\text{C}}{273} \right) = V_0 \frac{TK}{273}. \quad (6.12)$$

Тоді закон Гей-Люссака можна сформулювати так: *для певної маси газу при постійному тиску відношення об'єму до температури є величиною сталою:*

$$\frac{V}{T} = \frac{V_0}{T_0} = \text{const}. \quad (6.13)$$

При ізохорному процесі ($V = \text{const}$) ідеальний газ підпорядкований закону Шарля (1746–1823): *для певної маси газу при постійному об'ємі відношення тиску до температури є величиною сталою:*

$$\frac{p}{T} = \text{const}. \quad (6.14)$$

Графіки ізопроцесів показано на рис. 6.2, 6.3, 6.4.

Абсолютний нуль – це температура, при якій тиск газу стає рівним нулю, тому що припиняється поступальний і обертовий рух молекул. Залишаються тільки так звані «нульові» коливання молекул речовини.

6.4. Рівняння Менделєєва-Клапейрона

Рівняння стану ідеального газу (рівняння Клапейрона) зв'язує всі макроскопічні параметри термодинамічної системи:

$$\frac{pV}{T} = \text{const.} \quad (6.15)$$

Запишемо тиск газу через концентрацію n , середню кінетичну енергію молекул ідеального газу і температуру:

$$p = \frac{2}{3} n E_k = \frac{2}{3} \frac{N}{V} \cdot \frac{3}{2} kT, \quad (6.16)$$

де число молекул $N = \nu N_A$; число молів – ν ; m – маса газу. Тиск ідеального газу:

$$p = \frac{\nu N_A}{V} kT. \quad (6.17)$$

Підставивши у формулу (6.17) універсальну газову сталу $R = kN_A$, одержимо **рівняння стану ідеального газу**:

$$pV = \frac{m}{M} RT. \quad (6.18)$$

Це рівняння отримало назву **рівняння Менделєєва-Клапейрона**. Воно об'єднує експериментальні газові закони Бойля-Маріотта, Гей-Люссака та Шарля.

6.5. Закон Дальтона

Англійський фізик Джон Дальтон відкрив закон, що було названо його ім'ям. Закон Дальтона: **тиск суміші газів дорівнює сумі парціальних тисків газів, які входять до її складу**:

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_N, \quad (6.19)$$

де p_1, p_2, \dots, p_N – парціальні тиски газів, які входять у суміш.

6.6. Вологість повітря

Абсолютною вологістю повітря називається густина ρ водяної пари в повітрі за певної температури: $[\rho] = \text{г} / \text{м}^3$.

Відносною вологістю повітря φ називають відношення абсолютної вологості ρ до густини водяної пари ρ_H , необхідної для насичення повітря за певної температури:

$$\varphi = \frac{\rho}{\rho_H} 100\%. \quad (6.20)$$

Відносну вологість виражають у відсотках (%).

У метеорології відносну вологість визначають через відношення тисків:

$$\varphi = \frac{p}{p_H} 100\%,$$

де p – тиск водяної пари, що перебуває в повітрі за певної температури. Тиск насичуючої пари p_H – залежить від температури і не залежить від вільного від рідини об'єму посудини. **Точкою роси** на-

зи-вають температуру, при якій водяні пари,

що не насичували раніше повітря, стають такими, що насичують. Тиск насиченої пари зростає зі збільшенням його температури. На рис. 6.5 зображено графіки залежності тиску насиченої пари (p_H) та ідеального газу ($p_{газ}$) залежно від температури пару або газу.

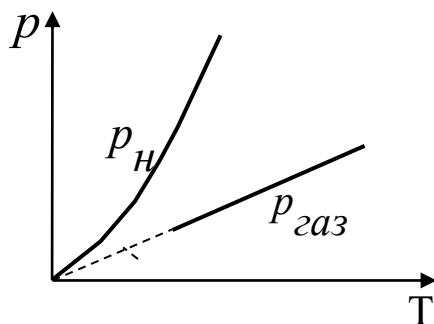


Рис. 6.5

6.7. Органи відчуття. Нюх і смак

Кожен аналізатор відчуттів складається зі сприймаючих утворень (рецепторів), нервових волокон і відповідних ділянок кори і підкірки головного мозку, де проходять остаточні аналіз і синтез збудження та формування наших відчуттів. Органи відчуття є периферичними частинами аналізаторів. Вони зумовлюють наступні основні види чутливості: нюх, смак, дотик, зір, слух, рівновагу і положення тіла в просторі.

Нюх – процес сприйняття запахів речовин. Елементи, що сприймають запахи речовин, розташовані в слизовій оболонці верхньої і частково середньої носових порожнин. Ці елементи представлені нюховими клітками. Рецепторні клітки мають короткі (15–20 мкм) периферичні відростки і довгі центральні. Тіла цих кліток знаходяться в товщі слизової оболонки. Нюхові рецептори складають орган хімічного відчуття. У людини їх близько 40 млн. Периферичні відростки нюхових клітин закінчуються булавоподібними потовщеннями. Ці потовщення на своїй вершині містять загострені волоски, що складаються з 9 пар ниток. Нюхові волоски є

своєрідними антенами, що активно взаємодіють з молекулами пахучих речовин.

Вважають, що молекули пахучих речовин осідають на поверхні слизистої носових порожнин і розчиняються у секреті залоз, також розташованих у слизовій носа. Розчинені таким чином речовини подразнюють нюхові волоски і булавоподібні потовщення. Звідси імпульси надходять нюховими нервами в центри нюху головного мозку, розташовані в проміжному мозку і корі. Там формується відчуття запаху речовин, що вдихаються. Система нюхових рецепторів, нюхових нервів і центрів нюху є аналізатором нюху. Утрата нюху проявляється в неможливості відчувати запахи речовин у повітрі, розпізнавати їжу, що зіпсувалася.

Смак – процес сприйняття смакових властивостей речовин, що потрапляють на рецептори слизистої оболонки і порожнини рота. Життєва роль смакових відчуттів, як і нюхових, менша, ніж у зорових і слухових. Розрізняють чотири основні види смаку: солоний, кислий, солодкий, гіркий. Усі інші види смакових відчуттів називаються присмаками.

Сприйняття смаку зумовлене смаковими сосочками з нирками, розташованими в слизовій оболонці. Смакові нирки розміщені на губах, надгортаннику і навіть на голосових зв'язках. Вони мають напівкруглу форму і складаються з подовжених, щільно прилеглих один до одного смакових і опорних клітин. На одному з кінців клітин є від чотирьох до п'ятдесяти якнайтонших ворсинок. На поверхні смакових клітин починаються нервові волокна. Вважають, що частинки їжі осідають на поверхні ворсинок смакових клітин і викликають їх подразнення. Збудження зі смакових рецепторів цибулин передається через волокна язикового нерва в довгастий мозок, а звідти – до зорових горбів і кори великого мозку. Там формується сприйняття у вигляді різних смакових відчуттів. Уся ця система є аналізатором смаку якостей харчових речовин. Найбільша чутливість до солодкого – на кінчику язика, до гіркого – на корені, до кислого – на краях, до солоного – на кінчику і краях. Різні види рецепторів розташовані в епідермісі та власне шкірі. Будова їх неоднакова.

Рецептори мають форму пластинок, дисків, нагадують колби і відрізняються не тільки формою, але й функціями. Одні сприймають дотик, інші – тиск, холод, тепло, біль. Деякі рецептори здатні

одночасно сприймати механічні і температурні роздратування. Більші відчуття можна розглядати як одну з форм дотику.

Навколо волосяних сумок шкіри розташовані дуже чутливі рецептори, що вловлюють невелике відхилення волосків при ніжному дотику до них. Найбільшу чутливість мають нервові закінчення кінчиків язика, губ, меншу – кінчики пальців рук, долонь. Низька чутливість до дотиків у шкіри спини, стоп, живота.

Контрольні запитання

1. Сформулюйте основні положення МКТ.
2. Що називають атомом, молекулою?
3. Запишіть формулу для обчислення кількості речовини.
4. Що таке число Авогадро?
5. Як обчислити масу молекули через її молярну масу?
6. Який рух називають броунівським?
7. Який газ називають ідеальним?
8. Запишіть формули середньої кінетичної енергії молекули газу.
9. Що називають термодинамічною температурою?
10. Який зв'язок між температурами за шкалою Цельсія і Кельвіна?
11. Запишіть основне рівняння МКТ.
12. Які процеси називають квазістатичними, нестатичними?
13. Які ізопроееси в газах ви знаєте?
14. Сформулюйте і запишіть формули ізопроеесів.
15. Запишіть рівняння Менделєєва – Клапейрона.
16. Сформулюйте закон Дальтона.
17. Що називають абсолютною і відносною вологістю повітря?
18. Запишіть формулу відносної вологості повітря.
19. Що називають точкою роси?

7. КЛАСИЧНА СТАТИСТИКА. ЯВИЩА ПЕРЕНЕСЕННЯ

7.1. Швидкості молекул газу. Розподіл Максвелла

За результатами експериментів, при хаотичному русі і зіткненні молекули набувають швидкості в широкому інтервалі температур. Користуючись законами статистичної фізики і теорії ймовірностей, Д. Максвелл (1831–1879) отримав формулу для розподілу швидкостей ідеального газу:

$$dN(v) = Nf(v)dv = 4\pi N \left(\frac{m_0}{2\pi kT} \right)^{\frac{3}{2}} v^2 e^{-\frac{mv^2}{2kT}} dv, \quad (7.1)$$

де $dN(v)$ – число молекул, швидкості яких лежать у границях v і $v + dv$; N – загальне число молекул; $f(v) = \frac{dN(v)}{Ndv}$ – функція розподілу молекул за швидкостями.

Графік функції розподілу молекул ідеального газу за швидкістю $f(v)$ наведено на рис. 7.1. Згідно з графіком, кількість молекул, які мають дуже великі або дуже малі швидкості, незначна.

Найбільш імовірну швидкість $v_{\dot{i}}$, яку має більша частина молекул, можна визначити, прирівнявши похідну від функції розподілу за швидкістю до нуля

до нуля $\frac{df(v)}{dv} = 0$, звідки

$$v_{\dot{i}} = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{2RT}{M}}. \quad (7.2)$$

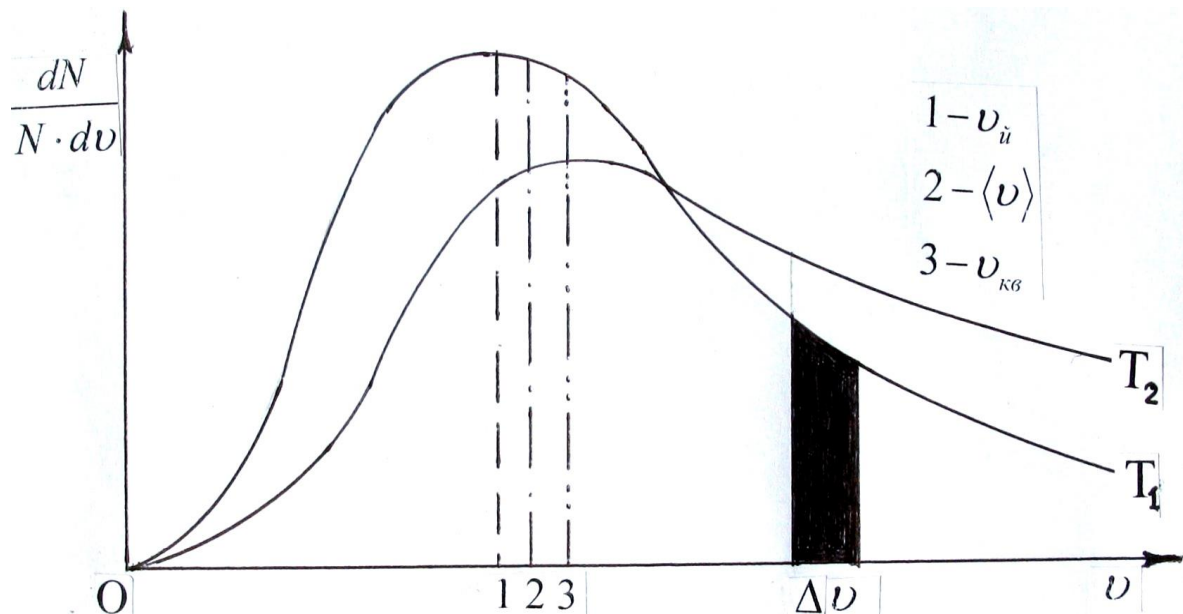


Рис. 7.1

Середню арифметичну швидкість визначають діленням суми швидкостей усіх молекул на їх загальне число:

$$\langle v \rangle = \frac{1}{N} \int_0^{\infty} v dN(v) = \int_0^{\infty} v f(v) dv. \quad (7.3)$$

Підставивши у формулу (7.1) функцію розподілу, після інтегрування отримаємо:

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}. \quad (7.4)$$

Визначені за допомогою дослідів швидкості молекул газів та парів металів підтвердили закон розподілу молекул за швидкостями.

7.2. Барометрична формула. Розподіл Больцмана

Завдяки гравітаційному полю Землі й тепловому руху концентрація молекул і тиск повітря зменшуються з висотою. Розглянемо розподіл молекул повітря залежно від висоти за умови, що повітря – ідеальний газ, температура якого не змінюється з висотою. Виберемо на висоті h над поверхнею землі шар повітря у формі циліндра висотою dh і площею основи S (рис. 7.2).

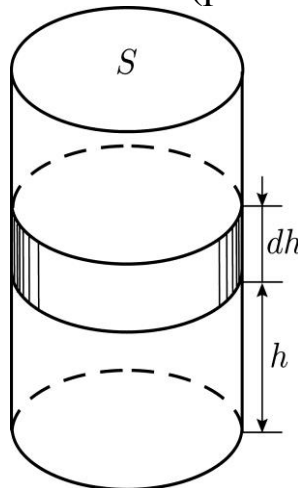


Рис. 7.2

Тиск шару повітря висотою dh :

$$dp = -\rho g dh, \quad (7.5)$$

де густина $\rho = \frac{m}{V} = \frac{Mp}{RT}$; M – молярна маса; R – газова стала.

Після нескладних перетворень отримаємо:

$$\frac{dp}{p} = -\frac{Mgh}{RT}. \quad (7.6)$$

Проінтегруємо формулу (7.6):

$$\int_{p_0}^p \frac{dp}{p} = - \int_0^h \frac{Mgh}{RT}. \quad (7.7)$$

Після інтегрування отримаємо так звану барометричну формулу

$$p = p_0 e^{-\frac{Mgh}{RT}}. \quad (7.8)$$

Замінивши $M = m_0 N_A$ і $R = k N_A$, отримаємо розподіл Больцмана частинок залежно від потенціальної енергії:

$$n = n_0 e^{-\frac{m_0 gh}{kT}} = n_0 e^{-\frac{W^n}{kT}}. \quad (7.9)$$

На рис. 7.3 наведено теоретичний розподіл молекул водню, гелію і кисню за висотою в гравітаційному полі Землі. Сильні вітри у високих шарах атмосфери, які супроводжуються турбулентним рухом повітря, приводять до того, що відсотковий склад повітря до висоти майже 500 км не змінюється. Розподіл Больцмана задовільно описує також розподіл пилу в атмосфері в безвітряну погоду.

На висоті 20–50 км під дією ультрафіолетового випромінювання Сонця молекули кисню розділяються на атоми та молекули озону O_3 , який поглинає ультрафіолетову сонячну радіацію.

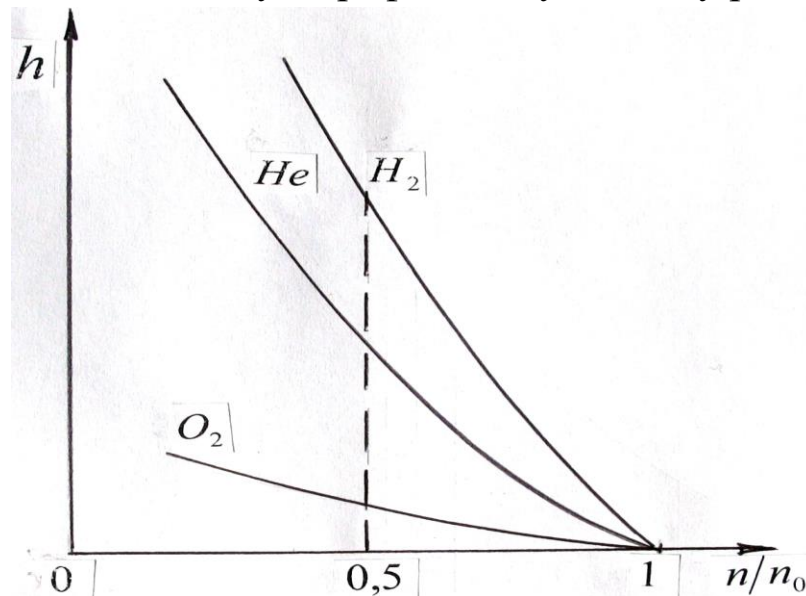


Рис. 7.3

Формула (7.9) лежить в основі *методу седиментації* – вимірювання швидкості осідання частинок у в'язкій рідині, наприклад, компонент крові, аерозолів у повітрі та ін.

7.3. Середня довжина вільного пробігу молекул газу

Молекули газу, які рухаються хаотично, зіштовхуються між собою, проходячи різні відстані між зіткненнями. Середню довжину вільного пробігу молекул між зіткненнями знайдемо, поділивши середню швидкість на середнє число зіткнень:

$$\langle \lambda \rangle = \frac{\langle v \rangle}{\langle z \rangle}. \quad (7.10)$$

Для визначення $\langle z \rangle$ спочатку прийнемо, що молекула радіусом r рухається, а інші перебувають у стані спокою. Рухаючись, ця молекула зіткнеться з тими молекулами, центри яких лежать на віддаленні менше $2r = d$ від напрямку руху (рис 7.4). Таким чином, рухома молекула може зіткнутися з молекулами, що знаходяться в об'ємі ци-ліндра $4\pi r^2 \langle v \rangle$, де $\langle v \rangle$ – середня відстань, яку молекула проходить за 1с. Число зіткнень:

$$\langle z \rangle = 4\pi r^2 \langle v \rangle \sqrt{2} n = \sqrt{2} \pi d^2 \langle v \rangle n, \quad (7.11)$$

де n – концентрація молекул; $\sqrt{2}$ – коефіцієнт, який ураховує рух інших молекул; d – ефективний діаметр молекули – мінімальна відстань, на яку можуть наближатися молекули при зіткненні.

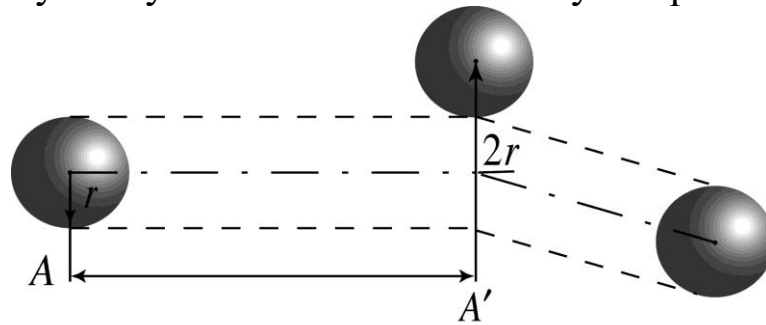


Рис. 7.4

Підставивши вираз (7.11) у формулу (6.10) для середньої довжини вільного пробігу, отримаємо:

$$\langle \lambda \rangle = \frac{\langle v \rangle}{\sqrt{2} \pi d^2 \langle v \rangle n} = \frac{1}{\sqrt{2} \pi d^2 n}. \quad (7.12)$$

Залежність середньої довжини вільного пробігу від тиску й температури можна отримати за допомогою формули $p = nkT$.

7.4. Явища перенесення

Хаотичний рух молекул і їх зіткнення приводять до виникнення явищ, які супроводжуються перенесенням маси (дифузія), теплової енергії (теплопровідність), імпульсу (в'язке тертя).

7.4.1. Теплопровідність. Закон Фур'є

Теплопровідність – це властивість речовини проводити тепло через теплопередачу. Передача тепла здійснюється за допомогою: а) конвекції (механічного перемішування); б) електромагнітного випромінювання; в) теплопередачі (теплообміну). Процес теплопередачі описує закон Фур'є: *кількість теплоти ΔQ , перенесеної від гарячого шару з температурою T_1 до холодного шару з температурою T_2 , пропорційна градієнту температур, площі контактуючих шарів S і часу* (рис. 7.5):

$$\Delta Q = -\kappa \frac{dT}{dx} S \Delta t, \quad (7.13)$$

де κ – коефіцієнт теплопровідності; $\frac{dT}{dx}$ – градієнт температури, тобто зміна температури на одиницю відстані між шарами; Δt – час.

Для газів коефіцієнт теплопровідності може бути виведено з молекулярно-кінетичної теорії:

$$\kappa = \frac{1}{3} \langle \lambda \rangle \langle v \rangle c_v \rho, \quad (7.14)$$

де c_v – питома теплоємність при сталому об'ємі; ρ – густина газу.

Згідно з формулою визначальною в теплопровідності газів є середня швидкість, тому важкі гази мають меншу теплопровідність, ніж легкі (за нормальних умов теплопровідність кисню становить $0,024 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, водню – $0,176 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$).

7.4.2. В'язке тертя. Закон Ньютона

Під час руху рідини або тіл у рідині чи газі внаслідок обміну молекул імпульсами між шарами рідини виникає в'язке тертя. Це явище описує закон Ньютона: *сила в'язкого тертя при відносному*

русі двох шарів рідини або газу пропорційна градієнту швидкості і площі дотику цих шарів (рис. 7.6):

$$F = -\eta \frac{dv_x}{dz} S, \quad (7.15)$$

де η – коефіцієнт в'язкого тертя (динамічної вязкості); $\frac{dv_x}{dz}$ – градієнт швидкості; S – площа дотику шарів газу.

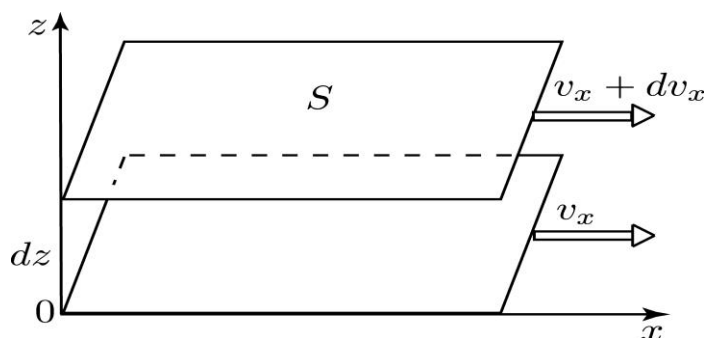


Рис. 7.6

Молекулярно-кінетична теорія дає такий вираз для коефіцієнта в'язкого тертя газів:

$$\eta = \frac{1}{3} \langle \lambda \rangle \langle v \rangle \rho, \quad (7.16)$$

де $\langle v \rangle$ – середня швидкість; ρ – густина газу.

Зростання в'язкості крові (норма $4,5 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$) і пов'язане з ним підвищення агрегації еритроцитів спостерігається при атеросклерозі, венозному тромбозі, гіпертонії, інфаркті міокарда та ін.

7.4.3. Дифузія. Закон Фіка. Осмос

Дифузія – явище спонтанного переміщення молекул речовини з місць із більшою концентрацією в місця з меншою концентрацією внаслідок теплового руху. Розглянемо процес самодифузії в циліндричній посудині, де концентрація газу зменшується в напрямі осі x (рис. 7.7). Перенесення маси при дифузії описує закон Фіка: *маса перенесеної речовини прямо пропорційна градієнту густини, площі, через яку відбувається перенесення, і часу:*

$$\Delta m = -D \frac{d\rho}{dx} S \Delta t, \quad (7.17)$$

де D – коефіцієнт дифузії; ρ – густина газу; S – площа перерізу.

Знайдемо коефіцієнт дифузії для газів. Унаслідок хаотичності руху в середньому в кожному напрямі рухається одна шоста всіх молекул. Через переріз посудини площею S за час Δt пройдуть молекули, які знаходяться на відстані від $-\lambda$ до $+\lambda$ масою

$$\Delta m = -\frac{1}{6} S \langle \lambda \rangle \Delta \rho, \quad (7.18)$$

де $\langle \lambda \rangle$ – середня довжина вільного пробігу молекул, $\Delta \rho$ – зміна густини на відстані від $-\lambda$ до $+\lambda$.

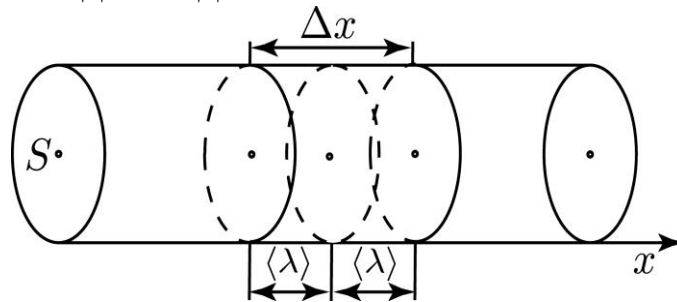


Рис. 7.7

Уведемо градієнт густини – зміну концентрації газу на одиницю довжини вздовж осі x $\frac{d\rho}{dx}$, тоді зміна густини на відстані Δx :

$$\Delta \rho = \frac{d\rho}{dx} \frac{\Delta x}{\Delta t} \Delta t, \quad \text{де} \quad \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{2\lambda}{\Delta t} = 2\langle v \rangle. \quad (7.19)$$

Підставивши вираз (7.19) у формулу (7.18), отримаємо:

$$\Delta m = -\frac{1}{3} \langle \lambda \rangle \langle v \rangle \frac{d\rho}{dx} S \Delta t. \quad (7.20)$$

Уведемо коефіцієнт дифузії D . Для газів він залежить від швидкості молекул і середньої довжини вільного пробігу:

$$D = \frac{1}{3} \langle \lambda \rangle \langle v \rangle. \quad (7.21)$$

Співвідношення між коефіцієнтами перенесення газів наведено в табл. 7.1.

Процес односторонньої дифузії молекул розчинника крізь напівпроникну мембрану в напрямку більшої концентрації розчиненої речовини (**осмос**) відіграє важливу роль у біологічних процесах.

Дифузія життєво важливих речовин (іонів натрію, калію, магнію, кальцію та ін.) через клітинні мембрани має специфічні особливості, зумовлені напівпроникністю мембран.

Біологічні мембрани клітин, товщина яких становить менше 0,01 мкм, пропускають молекули розчинника, які мають малий діаметр (наприклад, воду, кисень), і не пропускають молекули розчинної речовини (солі, білка, сахарози та інших великих білкових молекул).

Таблиця 7.1

Рівняння явищ перенесення та коефіцієнти перенесення для газів

Явище	Величина, що переноситься	Рівняння процесу	Коефіцієнт перенесення
Дифузія	Маса	$\Delta m = -D \frac{d\rho}{dx} S \Delta t$	$D = \frac{1}{3} \langle \lambda \rangle \langle v \rangle$
Внутрішнє тертя	Імпульс	$F = -\eta \frac{dv_x}{dz} S$	$\eta = \frac{1}{3} \langle \lambda \rangle \langle v \rangle \rho$
Теплопровідність	Енергія	$\Delta Q = -\kappa \frac{dT}{dx} S \Delta t$	$\kappa = \frac{1}{3} \langle \lambda \rangle \langle v \rangle \rho c_v$

У капіляри легень кисень проникає крізь тоненьку стінку альвеол завдяки осмосу. Концентрація кисню в повітрі значно вища, ніж у капілярній крові, тому кисень проходить крізь напівпроникну мембрану. Завдяки дифузії ми дихаємо. Також цей процес частково забезпечує потрапляння поживних речовин з травної системи в кров і дію багатьох ліків. На рис. 7.8 схематично показано процес усмоктування поживних речовин у тонкому кишечнику людини.

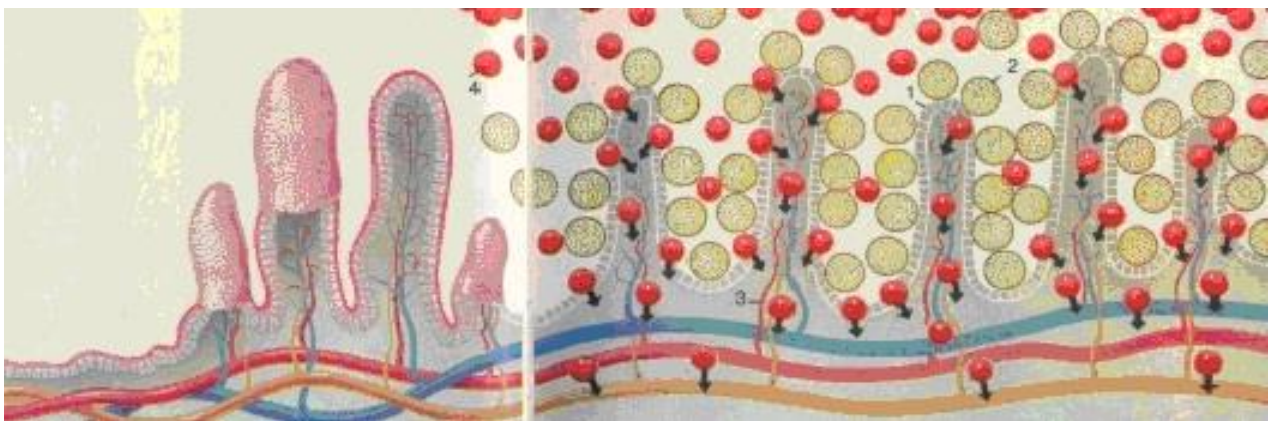


Рис. 7.8

Явище односторонньої дифузії (осмосу) можна спостерігати, якщо скляну трубку, закриту знизу мембраною і заповнену розчином цукру, помістити в посудину з водою. Вода з посудини проходить через мембрану в трубку, виникає додатковий осмотичний тиск, і розчин піднімається по ній до деякої висоти (рис. 7.9).

Голландський фізико-хімік Вант-Гофф (1852–1911) установив, що *осмотичний тиск чисельно дорівнює тиску, який чинила б розчинена речовина, якби вона знаходилась у стані ідеального газу і займала об'єм, який дорівнює об'єму всього розчину:*

$$p = \frac{m}{M} \frac{RT}{V} = \frac{mRT}{VM} = c \frac{RT}{M}, \quad (7.22)$$

де c – концентрація розчиненої речовини.

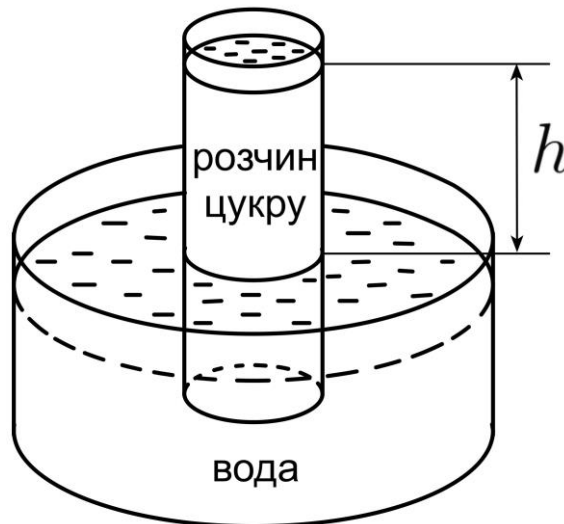


Рис. 7.9

Тиск залежить від концентрації речовин, розчинених у їх рідких середовищах, і може досягати 5 МПа.

У 2009 р. Державна енергетична компанія Statkraft (Норвегія) побудувала першу в світі екологічно чисту осмотичну електростанцію потужністю 5 кВт, у якій різниці рівнів досягають за рахунок дифузії прісної води у відсік з морською.

Контрольні запитання

1. Як знайти число молекул, швидкості яких лежать у межах від v до $v + dv$?
2. Які характерні швидкості молекул ви знаєте? Запишіть формули.
3. Запишіть барометричну формулу і формулу Больцмана.
4. Запишіть формулу найбільш імовірної, середньої і середньоквадратичної швидкостей молекул ідеального газу.

5. Від яких параметрів залежить довжина вільного пробігу молекул?
6. Які існують шляхи передачі тепла?
7. Що таке теплопередача? Запишіть формулу закону Фур'є.
8. Сформулюйте закон Ньютона. Запишіть формулу закону.
9. Який фізичний зміст коефіцієнта внутрішнього тертя?
10. Що таке дифузія? Запишіть закон Фіка.
11. Який фізичний зміст коефіцієнта дифузії?
12. Запишіть формулу коефіцієнта дифузії газу.
13. Дайте визначення поняття «осмос»?
14. Запишіть формулу закону Вант-Гоффа.

8. РЕАЛЬНІ ГАЗИ. ВЛАСТИВОСТІ РІДИНИ І ТВЕРДОГО ТІЛА

8.1. Реальні гази. Рівняння Ван-дер-Ваальса

У 1869 р. англійський хімік Т. Ендрюс поставив експеримент з ізотермічного стиснення вуглекислого газу. Він виявив, що спочатку стиснення описують законом Бойля-Маріотта, а при деякому об'ємі газ починає конденсуватися при постійному тиску (тиск насиченої пари постійний) і перетворюється на рідину, яка фактично не стискується. Для опису реального газу голландський учений Ван-дер-Ваальс (1837–1923) увів поправки на власний об'єм молекул b і сили взаємодії молекул. Рівняння стану реального газу для одного моля має вигляд:

$$\left(p + \frac{a}{V_{\mu}^2}\right)(V_{\mu} - b) = RT, \quad (8.1)$$

де a/V_{μ}^2 – додатковий внутрішній тиск молекул реального газу, який виникає внаслідок взаємодії молекул; поправки a і b для кожного газу визначають за допомогою дослідів.

Теоретичні ізотерми Ван-дер-Ваальса для різних температур наведено на рис. 8.1. При високих температурах ізотерми подібні до ізо-терм ідеального газу, при низьких – об'єм може приймати три різних значення. Між ними є критична ізотерма T_K , яка містить точку перетину К. Розглянемо ізотерму, яка має температуру, меншу від критичної. Ділянка 1-2 – стиснення ненасиченої пари.

У точці 2 пара стає насиченою. На ділянці 2-3-4-5-6 співіснують насичений пар і рідина. Ділянка 6-7 описує процес стиснення рідини. Експериментальна ізотерма відхиляється від кривої 2-3-4-5-6 і спрямована по ізобарі 2-6.

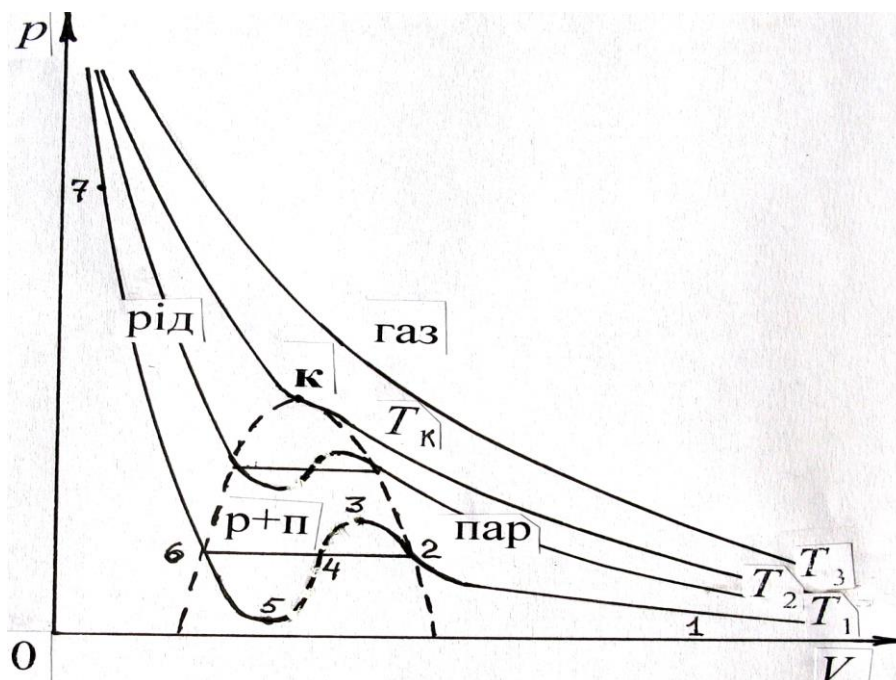


Рис. 8.1

Якщо дослід проводити з дуже чистою речовиною, то можна досягти станів 2-3 (перенасичений пар) і 6-5 (перегріта рідина). Ділянку 3-4-5 не виявлено дослідом. Якщо з'єднати крайні точки горизонтальних ділянок ізотерм Ван-дер-Ваальса, то виявляються області існування рідкої фази *p*, рідини і пари *p+n*, пари *пар*, газу *газ* (стан газу, нижчий від критичної температури називають паром, а вищий – газом).

8.2. Властивості рідини

8.2.1. Структура і властивості води

Рівняння Ван-дер-Ваальса якісно описують перехід від рідкого до газоподібного стану. Молекули рідини розташовані не зовсім хаотично, кожна з них оточують 5–6 сусідніх, центри яких лежать у вершинах багатокутників. Таке розташування називають *близьким порядком*, на відміну від кристалів, де реалізовано *далекий поря-*

док. Між молекулами рідини діють слабкі ван-дер-ваальсівські сили, обернено пропорційні шостій степені відстані між молекулами. При зростанні температури в'язкість рідини зменшується, а коефіцієнт дифузії зростає. Рідина поглинає (абсорбує) гази, кількість яких збільшується з тиском.

Найзагадковішою рідиною в природі є вода. Фізичні властивості води своєрідні й часто аномальні порівняно з іншими рідинами. Зокрема, вона має незвично високу теплоємність, теплоту плавлення і теплоту пароутворення. Важливим для біосфери є значне збільшення її густини при замерзанні. Аномальні властивості води зумовлені водневими зв'язками і структурою її молекул. У молекулі води два протона утримуює кисень завдяки дуже сильним водневим зв'язкам. Тривимірна структура води виникає через одночасне виконання таких умов: чотири водневих зв'язки на одну молекулу й оптимальні розміри молекул, які відповідають оптимальним напрямкам водневих зв'язків (рис. 8.2). Таку структуру має увесь об'єм льоду, а в рідині вона зберігається частково.

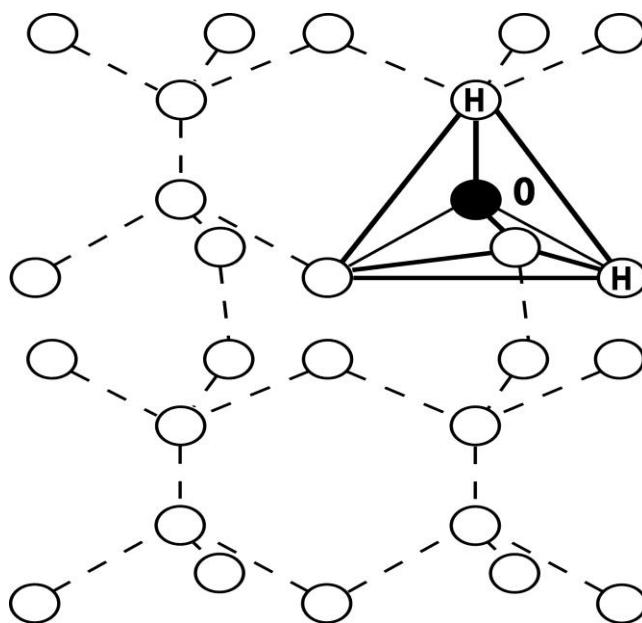


Рис. 8.2

У живих організмах вода знаходиться в тонких прошарках, товщина яких близька до розмірів водневих зв'язків, і її молекули втрачають рухливість. Вода, яка міститься в тонкому шарі, що розділяє мембрани клітини, у 70 разів краще проводить тепло і в 10 разів зменшує зовнішнє електричне поле. Це пов'язано з дією біоло-

гічних по-верхонь на воду і, навпаки, вода забезпечує стабільність клітинних мембран. Вода – це не просто середовище біологічного об'єкта, а ніби елемент живого. За оцінками експертів ВООЗ, близько 75 % усіх захворювань пов'язані зі споживанням неякісної води. 94 % усіх світових запасів води становить солоний Світовий океан і тільки близько 6 % – прісна вода, з якої 4,12 % – під землею. Тому потрібно покращувати екологію відкритих джерел води і не забруднювати підземні.

8.2.2. Поверхневий натяг. Капілярні явища

Поверхневий шар рідини за своїми властивостями відрізняється від її внутрішніх частин, адже результуюча сил міжмолекулярної взаємодії на поверхні не дорівнює нулю (рис. 7.3). Унаслідок цього результуючі сили міжмолекулярної взаємодії поверхневого шару чинять на рідину тиск, який називають молекулярним. Цей тиск приводить до появи поверхневої (потенціальної) енергії, пропорційної площі поверхні ΔS :

$$\Delta W = \sigma \Delta S, \quad (8.2)$$

де σ – коефіцієнт поверхневого натягу.

Поверхнева енергія дорівнює роботі, яку необхідно виконати для збільшення поверхні на величину ΔS , тобто $\Delta W = A$. Розмірність коефіцієнта поверхневого натягу:

$$[\alpha] = \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2} = \frac{\text{Н}}{\text{м}}. \quad (8.3)$$

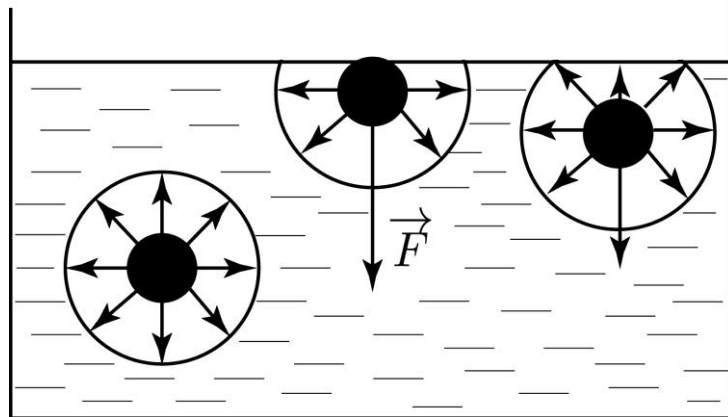


Рис. 8.3

Коефіцієнт поверхневого натягу можна визначати як силу, яка діє на одиницю довжини плівки:

$$[\alpha] = \frac{F}{\ell}. \quad (8.4)$$

Крапля рідини на поверхні твердого тіла розтікається по його поверхні, якщо сили притягання між молекулами тіла і рідини більші за сили притягання між молекулами рідини – відбувається **явище змочування** (рис. 8.4, а, в). Кут θ (рис. 8.4) називається крайовим кутом. Якщо сили притягання між молекулами тіла і рідини менші від сил притягання між молекулами рідини, відбувається **явище незмочування** (рис. 8.4, б, г).

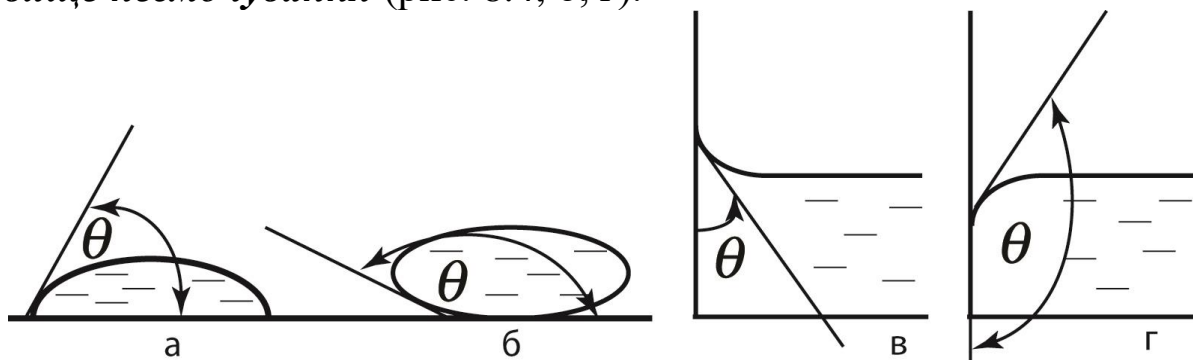


Рис. 8.4

Явища змочування і незмочування призводять до викривлення поверхні рідини біля стінки посудини (рис. 8.4, в, г). Під викривленою поверхнею рідини (меніском) утворюється додатковий тиск, зумовлений силами поверхневого натягу, які намагаються зменшити її поверхню.

Опуклий меніск чинить на рідину додатковий тиск Δp , напрямлений униз (рис. 8.4, а), угнутий меніск зменшує тиск на рідину (рис. 8.4, б). Визначимо додатковий тиск через роботу сил поверхневого натягу на зменшення поверхні сферичної краплі радіусом R на величину dS і об'єм на dV :

$$dA = \alpha dS = \Delta p dV, \quad (8.5)$$

$$\text{де } S = 4\pi R^2; \quad dS = 8\pi R dR; \quad V = \frac{4\pi R^3}{3}; \quad dV = 4\pi R^2 dR.$$

Підставивши dS і dR у формулу (8.5), отримаємо:

$$\Delta p = \frac{2\alpha}{R}. \quad (7.6)$$

Додатковий тиск під викривленою поверхнею рідини в загальному випадку з меніском з подвійною кривизною (головні радіуси подвійної кривизни R_1 і R_2) описують формулою Лапласа:

$$\Delta p = \pm \alpha \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right). \quad (8.7)$$

З формул (8.6) і (8.7) видно, що додатковий тиск обернено пропорційний радіусу кривизни, тому він дуже помітний у трубках малого діаметра (капілярах). Поверхневий натяг може спричинити заку-порку судин, через які протікає рідина, якщо в кровоносну судину людини або рослини потрапить газова бульбашка (наприклад, кесонна хвороба у водолазів).

Коли рідина тече, напір рідини зліва (рис. 8.5, в) вирівнює поверхню, а справа – викривляє ще більше. Додатковий тиск $\Delta p = \Delta p_2 - \Delta p_1$ спрямований проти течії рідини в трубках малого діаметра і може припинити течію рідини. При швидкому підйомі водолаза виникає кесонна хвороба. Унаслідок механічних пошкоджень повітря може потрапляти в судини дерев і рослин, закупорювати капіляри, що призведе до відмирання клітин.

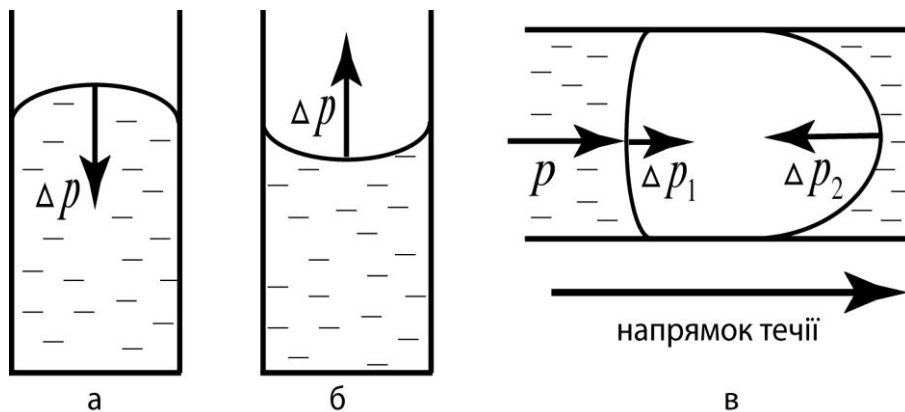


Рис. 8.5

Зміна висоти рівня рідини в трубках малого діаметра отримала назву капілярності. Висоту зміни рівня рідини в капілярі можна визначити за умови рівноваги додаткового і гідростатичного тисків (рис. 8.5, а, б):

$$\frac{2\alpha}{R} = \rho gh. \quad (8.8)$$

Висота зміни рівня рідини в капілярі:

$$h = \frac{2\alpha}{\rho g R} = \frac{2\alpha \cos \theta}{\rho g r}, \quad (8.9)$$

де $R = r / \cos \theta$ – радіус кривизни меніска; r – радіус капіляра.

Таким чином, висота підняття (опускання) рідини в капілярі збільшується зі зростанням коефіцієнта поверхневого натягу і зменшенням радіуса капіляра. Капілярні явища відіграють важливу роль у природі, техніці, сільському господарстві, лісівництві. Переріз стовбура деревини має річні шари, які складаються з величезної кількості капілярів, діаметр яких становить 0,016–0,40 мм. Капілярність і атмосферний тиск уносять певну частку в транспортування води і перенесення поживних речовин у рослинах, але основними є сили когезії між молекулами води та наявність від'ємного тиску.

Коефіцієнт поверхневого натягу залежить від хімічного складу рідини, природи сил зв'язку, температури та домішок. Цукор і сіль збільшують поверхневий натяг, а мило та жирні кислоти – зменшують.

Речовини, які послаблюють поверхневий натяг рідини, називають поверхнево-активними (*ПАР*). Їх застосовують у миючих засобах, емульгаторах, піноутворювачах, вони важливі у біологічних процесах на клітинному рівні. Личинки комарів, водяні жуки прикріплюються знизу до водяної плівки. Для боротьби з малярійними комарами на поверхню водойми наносять тонкий шар поверхнево-активної речовини. Личинки комарів, яких не втримує поверхнева плівка, занурюються у воду і, позбавлені повітря, гинуть.

У поверхневому шарі альвеол легень є моношар сульфактанту – поверхнево-активної речовини, який збільшує тиск у альвеолах і перешкоджає їх складанню при глибокому видиху. Якщо сульфактанту недостатньо, то розвивається легенева недостатність.

Важливу роль відіграє *ПАР* у процесах травлення, коли клітини організму захоплюють зовнішні речовини і перетравлюють їх. Захоплення здійснюється за допомогою вип'ячувань, що виникають на поверхні клітин унаслідок зменшення поверхневого натягу. Здатність жовчі сприяти травленню жирів залежить не тільки від її хімічної дії. Жовч відносно жирів є *ПАР*, тому зменшує поверхневий натяг крапель жиру, що сприяє їх подрібненню.

Вимірювання коефіцієнта поверхневого натягу клітин дало змогу вказати на наявність білків у цитоплазматичній мембрані, що пізніше було підтверджено в електронно-мікроскопічних дослідженнях.

8.3. Твердий стан речовини

Більшість твердих тіл у природі має кристалічну будову, для якої характерною є строга періодичність у розташуванні атомів (молекул, іонів) у просторі. Таке розташування одержало назву *дальнього порядку*. Характерна особливість кристалічного стану – *анізотропія*, тобто залежність деяких фізичних властивостей від напрямку.

Ізотропні тверді тіла являють собою переохолоджені рідини. Причина анізотропії кристалів – наявність кристалічної решітки, яка іноді проявляється в правильному зовнішньому огрануванні кристалів. Зовнішнє огранування та анізотропія кристалів часто не виявляються, тому що, як правило, тіла мають вигляд полікристалів, які складаються з великої кількості безладно орієнтованих кристаликів.

У монокристалі частинки утворюють кристалічну решітку, у вузлах якої знаходяться атоми (рис. 8.6, а). Такий кристал можна отримати через багатократне повторення в трьох напрямках елементарної кристалічної комірки (рис. 8.6, б). Природні монокристали досягають великих розмірів. Штучні монокристали широко використовують у сучасній науці й техніці.

У кристалах густина розміщення частинок у різних напрямках різна. Цим зумовлена анізотропія властивостей кристалів. Залежно від природи атомів та характеру взаємодії між ними розрізняють іонні, атомні, металічні та молекулярні кристали.

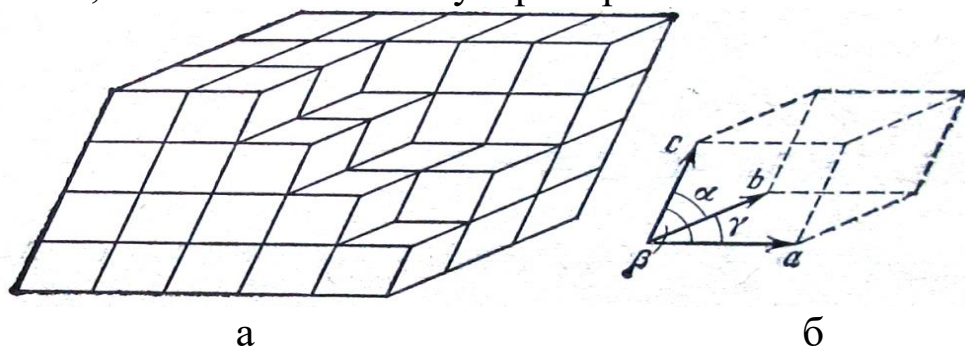


Рис. 8.6

Важливою властивістю твердих тіл є симетрія – здатність решітки збігатися із собою внаслідок переміщення, обертання навколо осей, дзеркального відображення відносно певних площин та ін. За можливими видами симетрії та розмірами ребер a , b , c і кутів α , β , γ (рис. 8.6) кристали поділяють на сім кристалографічних

систем (сингоній). З урахуванням можливих елементів симетрії російський учений Є.С. Федоров показав, що існує 230 комбінацій елементів симетрії (просторові групи), які розбиваються на 32 класи. На рис. 8.7 зображено кристалічні решітки більшості металів: кубічну об'ємно центровану (рис. 8.7, а), гранецентровану (рис. 8.7, б), гексагональну щільну (рис. 8.7, в).

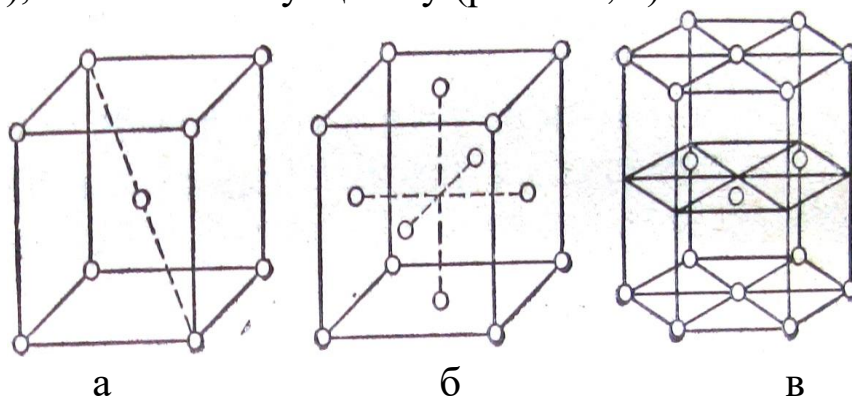


Рис. 8.7

Теоретичні розрахунки показують, що міцність ідеального кристала приблизно в 1000 разів більша за реальну. Теоретична міцність сталі на зсув становить:

$$\sigma = \frac{G}{2\pi} = \frac{2,16 \cdot 10^{11} \text{ Па}}{2 \cdot 3,14} = 3,44 \cdot 10^{10} \text{ Па}.$$

Реальна міцність сталі, яка не піддавалася термообробці, $\approx 10^7 \text{ Па}$.

Таку розбіжність пояснюють порушенням ідеальної кристалічної структури – точковими та лінійними дефектами. До точкових належать вакансії (відсутність атома у вузлі), атоми заміщення, атоми у міжвузлі. Точкові дефекти порушують ближній порядок, не зачіпаючи дальнього, а їхня концентрація експоненціально зростає з температурою.

Лінійні дефекти (дислокації) виявляються в тому, що одна з атомних площин обривається – порушується чергування кристалічних площин. Найпростішими видами дислокацій є крайова (рис. 8.8, а) та гвинтова (рис. 8.8, б). Крайова дислокація зумовлена залишковою півплощиною, вставленою між сусідніми шарами атомів. Лінія дислокації перпендикулярна до площини рисунка, пряма позначена так: \perp . Такі дефекти дуже знижують міцність – пластичну деформацію реальних кристалів спостерігають при значно менших механічних напругах, тому що міжатомні зв'язки руйнуються не одночасно, а по черзі (рис. 8.9). Таке переміщення атомів можна охарактеризувати як рух дислокації.

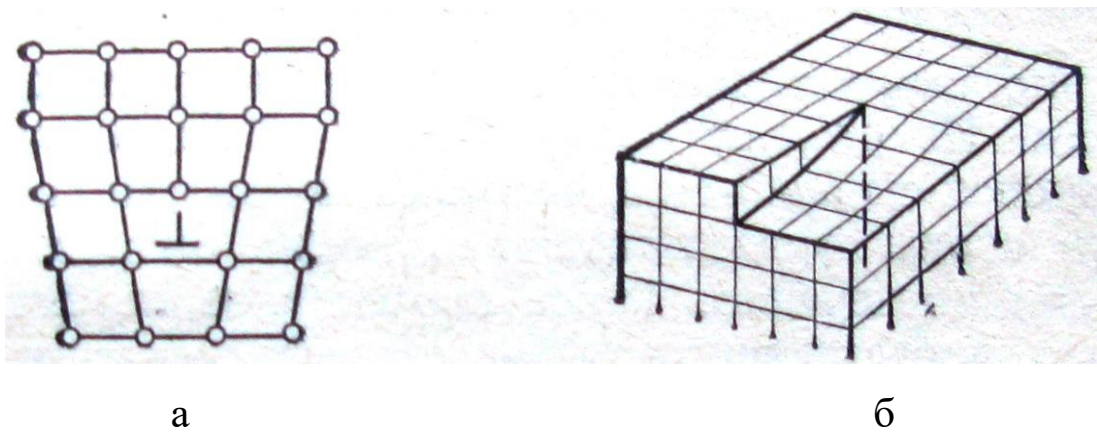


Рис. 8.8

Гвинтову дислокацію можна вважати результатом розрізування кристала по півплощині та зсуву частин решітки на один період (рис. 8.9, б). Кристал з гвинтовою дислокацією складається з однієї кристалічної площини, зігнутої за хвильовою площиною. Лінія дислокації збігається з віссю гвинта.

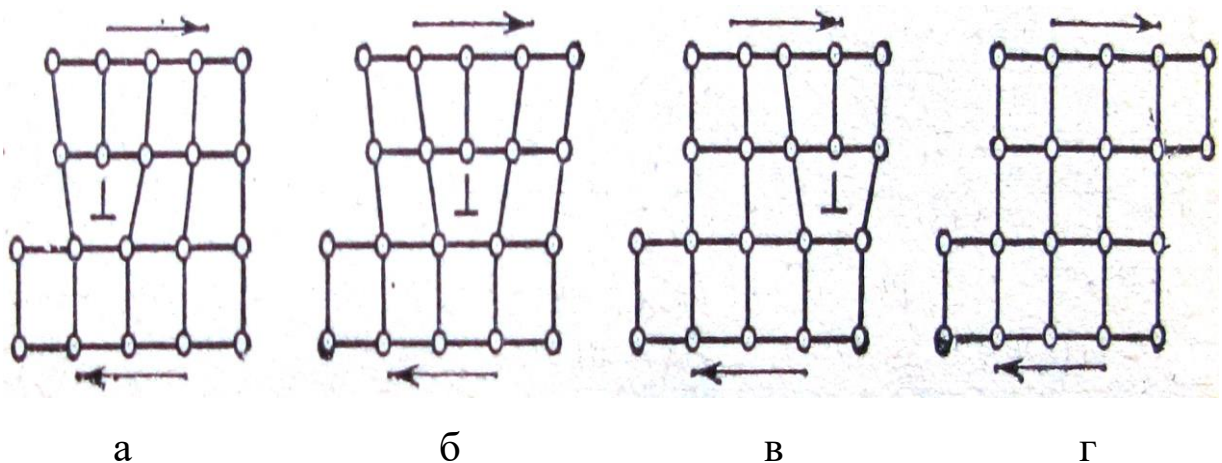


Рис. 8.9

Узагалі лінії дислокацій криві і складаються з крайових і гвинтових компонентів. На рис. 8.10 зображено електронно-мікроскопічну дислокаційну структуру в металічному берилії після деформації та відпалу. Дислокації утворюють сітчасті структури і малокутові границі блоків.

Механізм перенесення маси в твердих тілах відрізняється від механізму перенесення в рідині та газах. Для переходу атома з вузла кристалічної решітки у вакантний вузол, він повинен мати значну енергію коливального руху, тому залежність коефіцієнта дифузії від температури виражено експоненціальним законом (8.10).

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{\Delta W}{kT}\right), \quad (8.10)$$

де D_0 – стала, яка залежить від природи речовини; ΔW – кінетична енергія атома.

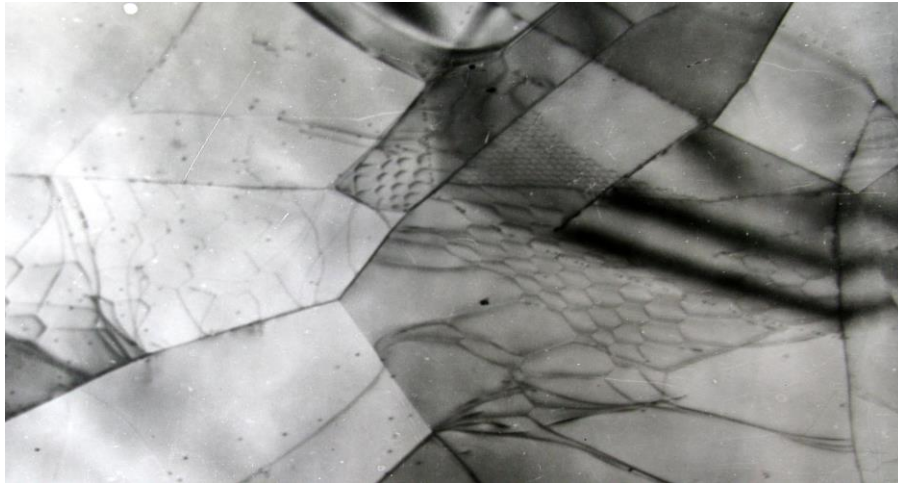


Рис. 8.10

Механізм теплопровідності твердого тіла теж відрізняється від теплопровідності газів. У твердих тілах (діелектриках і напівпровідниках) передача тепла здійснюється завдяки коливанням атомів кристалічної решітки. У металах теплопровідність забезпечують вільні (валентні) електрони.

8.4. Рідкі кристали

Рідина, у якій існує «дальній порядок» у розміщенні та взаємній орієнтації молекул, називається рідкокристалічною. Вона має властивості як рідини (плинність), так і твердого тіла (анізотропію електропровідності, теплопровідності, діелектричної проникності, магнітної сприйнятливості, оптичних властивостей).

Такий стан характерний для речовин, які мають довгі молекули. Існують *ліотропні й термотропні* рідкі кристали. Ліотропні поширені в живих організмах (мембрани клітин, віруси), це розчини мила у воді та ін. Термотропні рідкі кристали існують у певному інтервалі температур.

За ступенем упорядкованості молекул розрізняють *нематичні, смектичні й холестеричні рідкі кристали*. У нематичних кри-

сталах ниткоподібні молекули розміщено паралельно (рис. 8.11, а). У смектичних – шарами паралельно один до одного (рис. 8.11, б).

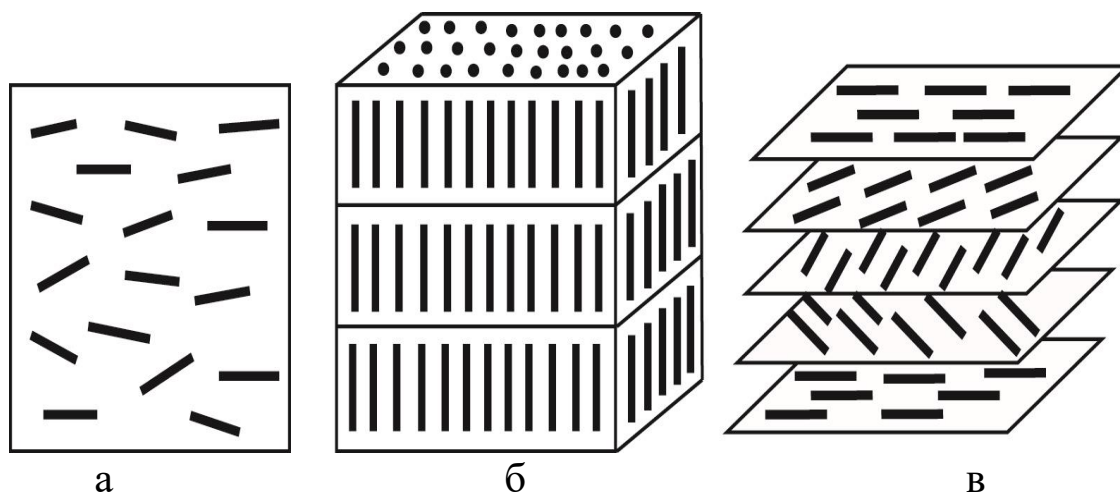


Рис. 8.11

У холестеричних (різновид нематичних) – молекули в одній площині розміщені паралельно одна до одної, але молекули кожної наступної площини повернуті на деякий кут відносно попередньої, утворюючи спіралеподібну структуру, яка дозволяє молекулам переміщуватися поступально, і не дає їм змоги обертатися (рис.8.11, в). Молекули рідких кристалів змінюють орієнтацію під впливом малих електричних і магнітних полів, які використовують для візуалізації інформації в рідкокристалічних моніторах комп'ютерів, телевізорів, у годинниках та ін. Холестеричні рідкі кристали змінюють забарвлення при зміні температури, що застосовують для вимірювання температури.

Система «мило – вода» – типовий приклад ліотропного смектичного рідкого кристала. Молекула мила має головку, яка розчиняється у воді, і вуглеводний ланцюжок, не розчинюваний у воді. Від'ємним електричним зарядом мильні диполі орієнтуються перпендикулярно до молекул води. Виникає структура подвійних шарів, у якій подвійний молекулярний шар мила межує з шаром води (рис. 8.12, а). Шарувата структура забезпечує рухливість шарів. Мило, як поверхнево-активна речовина, зменшує поверхневий натяг води, проникає в пори, зменшує сили зв'язку забруднюючих частинок з поверхнею, завдяки чому вони легко переходять у миючий розчин. Бішарувата ліпідна фаза біологічних мембран схожа на систему «мило–вода».

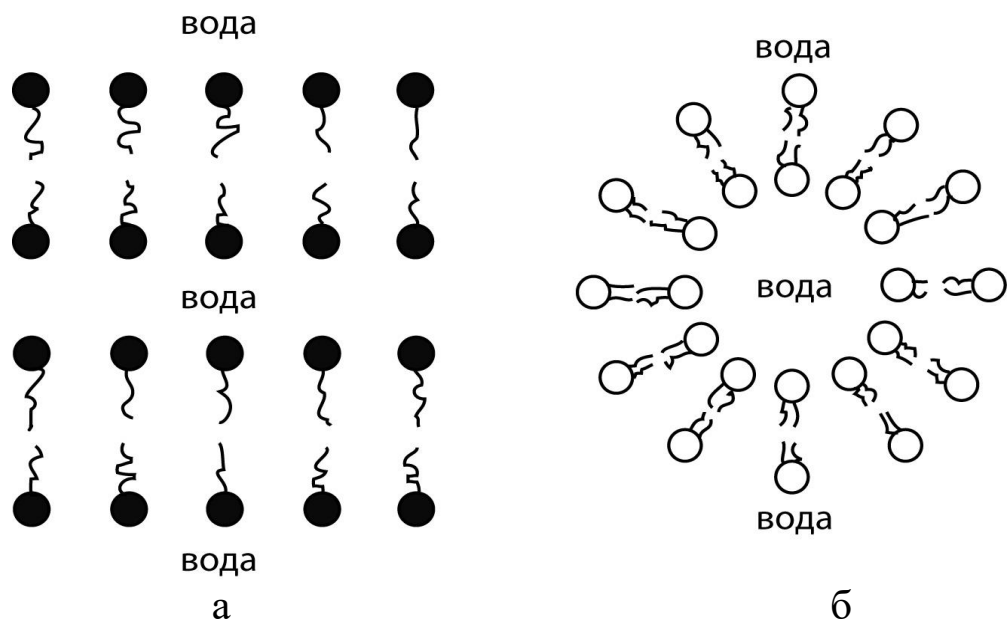


Рис. 8.12

Щоб позбутися країв, біліпідний шар замикається на собі, набуваючи кільцеподібної форми (рис 8.12, б). Рідкокристалічний стан біологічних мембран відіграє важливу роль у процесах йонного транспортування, механізмах фотосинтезу і зору, процесах самоорганізації біологічних структур.

Контрольні запитання

1. Чим реальний газ відрізняється від ідеального?
2. Запишіть рівняння Ван-дер-Ваальса.
3. Чому внутрішня енергія реального газу залежить від об'єму?
4. Який фізичний зміст коефіцієнтів a і b у рівнянні Ван-дер-Ваальса?
5. Чим газ відрізняється від пари?
6. Чим зумовлені аномальні властивості води?
7. Які особливості поверхневого шару рідини?
8. Дайте визначення коефіцієнта поверхневого натягу.
9. Як проявляється явище змочування?
10. Чим пояснюють наявність крайових кутів?
11. За якою формулою визначають додатковий тиск на рідину?
12. Що називають капілярами?
13. Які явища називають капілярними?
14. Що називають дальнім порядком у кристалі?
15. Що називають анізотропією?

16. Що називають симетрією?
17. Які види дефектів кристалічної будови ви знаєте?
18. Що таке вакансія, атом заміщення, атом у міжвузлі?
19. Що таке дислокація у кристалі і які її види ви знаєте?
20. Як коефіцієнт дифузії твердого тіла залежить від температури?
21. Який механізм теплопровідності в діелектриках?
22. Який механізм теплопровідності в металах?
23. Чому дорівнює внутрішня енергія твердого тіла?
24. Що називають рідкими кристалами?
25. Які існують види рідких кристалів?
26. Які властивості мають рідкі кристали?
27. У чому різниця між ліотропними та термотропними кристалами?
28. Як розрізняють рідкі кристали за ступенем упорядкованості ?
29. Яка роль рідких кристалів у біологічних структурах?
30. Що таке біліпідний шар?

9. ОСНОВИ ТЕРМОДИНАМІКИ

9.1. Перший закон термодинаміки

Термодинаміка – це розділ фізики, у якому вивчають теплові явища в газах, рідинах і твердих тілах на основі процесів перетворення енергії. Молекули й атоми речовини безупинно рухаються і взаємодіють між собою, тому речовина має внутрішню енергію.

Внутрішня енергія термодинамічної системи U – це сума кінетичних E_i^k і потенціальних E_i^n енергій усіх частинок (молекул або атомів), які утворюють систему:

$$U = \sum_{i=1}^n E_i^k + \sum_{i=1}^n E_i^n. \quad (9.1)$$

Кінетичної енергії частинки і тіла набувають унаслідок руху, а потенціальної – унаслідок взаємодії між собою. Кінетична енергія молекул залежить від числа незалежних координат (ступенів вільності), які має тіло в процесі руху. Рух твердого тіла в просторі визначають трьома поступальними ступенями вільності й трьома обертальними. Одноатомна молекула має три поступальних ступені вільності, двоатомна – три поступальних і два обертальних, триатомна – три поступальних і три обертальних. Якщо атоми в молекулі

коливаються (при високих температурах), то виникають і коливальні ступені вільності. Узагалі число ступенів вільності становить:

$$i = i_{\text{пост.}} + i_{\text{об.}} + 2i_{\text{кол.}} \quad (9.2)$$

На коливальний ступінь вільності припадає кінетична і потенціальна енергія, тому з'являється коефіцієнт 2. Больцман установив закон рівномірного розподілу енергії за ступенями вільності: у середньому на кожний ступінь вільності припадає однакова енергія:

$$E^k = \frac{i}{2} kT, \quad (9.3)$$

де $k = 1,38 \cdot 10^{-38}$ Дж/К – стала Больцмана.

Внутрішня енергія ідеального газу дорівнює добутку числа молекул N на середню кінетичну енергію однієї молекули:

$$U = E^k N = \frac{i}{2} kTN = \frac{i}{2} kTN_A \nu = \frac{i}{2} \nu RT = \frac{i}{2} \frac{m}{M} RT, \quad (9.4)$$

де $R = \kappa N_A$ – універсальна газова стала.

З формули (9.4) видно, що для заданої маси m внутрішня енергія ідеального газу та її зміна ΔU залежать тільки від температури і тому є функцією стану термодинамічної системи.

Розглянемо процес квазістатичного розширення газу в циліндрі об'ємом V під поршнем площею S при постійному тиску (рис. 9.1). Газ, розширюючись, тисне на поршень і виконує роботу:

$$A = F\Delta h = pS\Delta h = p\Delta V. \quad (9.5)$$

де Δh – переміщення поршня.

Під час розширення газ виконує додатну роботу, тому що напрямок сили і напрямок переміщення поршня збігаються. Робота газу при малому зміні об'єму: $dA = pdV$.

Якщо тиск газу змінюється, то робота дорівнює сумі робіт при малих змінах об'єму dV :

$$A = \int_{V_1}^{V_2} pdV. \quad (9.7)$$

Робота газу дорівнює сумі добутку тиску на зміну об'єму (рис. 9.1). Якщо термодинамічна система тіл виконує роботу, то внутрішня енергія зменшується ($A = -\Delta U$). Робота над системою приводить до збільшення внутрішньої енергії системи: ($\Delta U = -A$).

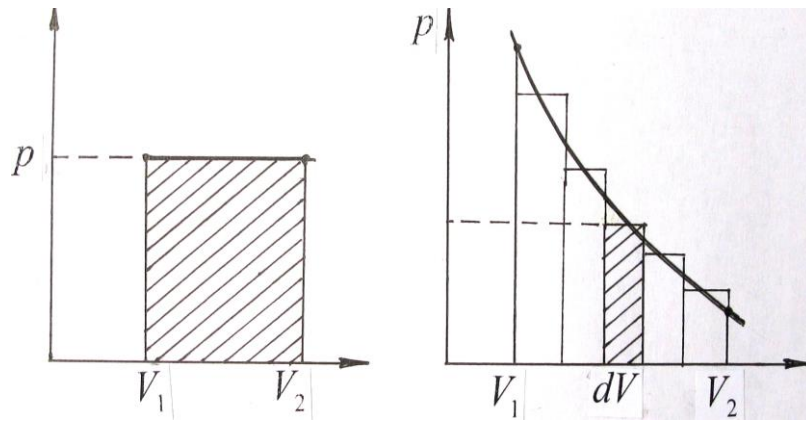


Рис. 9.1

Розглянемо роботу газу при ізопроцесах:

1. Ізотермічний процес ($T = \text{const}$):

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV = \nu RT \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = \nu RT \ln \frac{V_2}{V_1}, \quad (9.7)$$

де $p = \frac{\nu RT}{V}$ – рівняння Менделєєва – Клапейрона.

2. Ізобарний процес ($p = \text{const}$):

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV = p \int_{V_1}^{V_2} dV = p(V_2 - V_1). \quad (9.8)$$

3. Ізохорний процес ($V = \text{const}$):

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV = 0. \quad (9.9)$$

Розглянемо круговий термодинамічний квазістатичний процес (цикл). Циклічним називають процес, у результаті якого система, переходячи через проміжні стани, повертається до початкового стану.

Нехай термодинамічна система переходить з точки 1 з параметрами p_1, V_1, T_1 у точку 2 з параметрами p_2, V_2, T_2 шляхом 1-а-2, а з точки 2 в точку 1 шляхом 2-б-1 (рис. 9.2). У такому процесі робота до-рівнює різниці робіт, тому робота замкненим шляхом не дорівнює нулю:

$$A = \oint_V p dV \neq 0. \quad (9.10)$$

Таким чином, робота не є функцією стану, тому що не характеризує термодинамічну систему, оскільки залежить від форми шляху переходу.

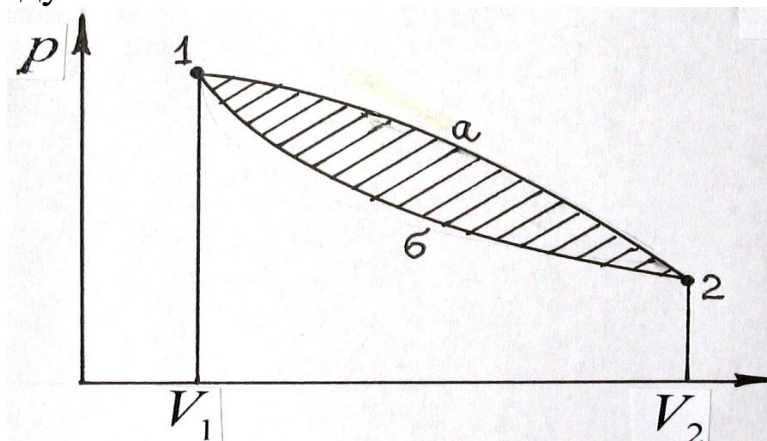


Рис. 9.2

Теплопередачею (теплообміном) називають процес зміни внутрішньої енергії ΔU термодинамічної системи без виконання роботи. Мірою зміни внутрішньої енергії ΔU при теплопередачі є кількість теплоти Q .

Якщо підводить до циліндра теплоту ззовні (див. рис. 9.1), то вона, згідно з законом збереження енергії, витрачається на роботу переміщення поршня і зростання внутрішньої енергії системи внаслідок теплопередачі.

Перший закон термодинаміки (закон збереження енергії в термодинамічних процесах): *кількість теплоти Q , що передана системі (тілу), дорівнює сумі зміни її внутрішньої енергії ΔU і роботі A системи проти зовнішніх сил:*

$$Q = \Delta U + A. \quad (9.11)$$

З першого закону термодинаміки випливає, що **внутрішню енергію** термодинамічної системи можна змінити за допомогою виконання роботи або теплопередачі (теплообміну). Застосуємо перший закон термодинаміки до ізопроесів у газах.

1. При ізотермічному розширенні ($m = \text{const}$, $T = \text{const}$) зміна внутрішньої енергії газу дорівнює нулю ($\Delta U = 0$), тому що $\Delta T = 0$. Передана газу кількість теплоти Q при ізотермічному процесі йде на виконання роботи розширення газу: $Q = A$.

2. При ізобарному розширенні ($m = \text{const}$, $p = \text{const}$) газ нагрівається і виконує роботу $Q = \Delta U + A$.

3. При ізохорному нагріванні ($m = \text{const}$, $V = \text{const}$) робота газу дорівнює нулю ($A = 0$). Передана системі (газу) кількість теплоти Q іде на збільшення внутрішньої енергії $Q = \Delta U$.

Важливою фізичною характеристикою речовини є теплоємність. Загальна теплоємність будь-якого тіла – кількість теплоти потрібна для нагрівання тіла на один градус.

Питома теплоємність називають величину, що чисельно дорівнює кількості теплоти dQ , яку необхідно передати одиниці маси ($m = 1\text{кг}$) речовини для нагрівання її на один кельвін ($dT=1\text{K}$):

$$C = \frac{dQ}{mdT}; \quad [C] = \frac{\text{Дж}}{\text{кгК}}. \quad (9.12)$$

За формулою (9.12) можна обчислити кількість теплоти Q , потрібної для нагрівання будь-якого тіла.

Молярною теплоємністю називають величину, чисельно рівну кількості теплоти dQ , яку необхідно передати одному молю речовини для нагрівання її на один кельвін:

$$\tilde{C} = \frac{dQ}{\nu dT} = \frac{MdQ}{mdT} = MC. \quad (9.13)$$

Газ можна нагріти при постійному тиску або при постійному об'ємі, тому розрізняють теплоємність при постійному об'ємі C_v і при постійному тиску C_p . Знайдемо молярну теплоємність при постійному об'ємі:

$$\tilde{C}_v = \frac{dQ}{\nu dT} = \frac{dU}{\nu dT}. \quad (9.14)$$

Заміняємо dQ на dU , адже робота при постійному об'ємі не виконується. Молярна теплоємність при постійному тиску:

$$\tilde{C}_p = \frac{dQ}{\nu dT} = \frac{dU}{\nu dT} + \frac{pdV}{\nu dT} = \tilde{C}_v + R, \quad (9.15)$$

де R – робота одного моля газу при збільшенні температури на 1K при постійному тиску – універсальна газова стала. Рівняння (9.15) було отримано Р. Майєром (1814–1878).

Підставимо у формули теплоємності значення внутрішньої енергії:

$$\tilde{C}_v = \frac{1}{\nu} \left(\frac{dU}{dT} \right)_v = \frac{1}{\nu} \frac{d}{dT} \left(\frac{i}{2} \nu RT \right) = \frac{i}{2} R. \quad (9.16)$$

$$\tilde{C}_p = \frac{1}{\nu} \left(\frac{dU}{dT} \right)_p + \frac{1}{\nu} \left(\frac{dA}{dT} \right)_p = \frac{i}{2} R + R. \quad (9.17)$$

Внутрішня енергія і швидкість її зміни $\frac{dU}{dT}$ не залежать від p і V .

Внутрішня енергія одного моля кристалічної решітки твердого тіла визначається енергією коливань частинок навколо вузлів кристалічної решітки:

$$W = W_k + W_n = 2W_k = 2 \frac{3}{2} k T N_A = 3RT, \quad (9.18)$$

де W_k – кінетична енергія; W_n – потенціальна енергія.

Молярна теплоємність кристалічної решітки становить:

$$\tilde{C} = \frac{dU}{dT} = \frac{d}{dT} (3RT) = 3R. \quad (9.20)$$

Теплоємність хімічно простих кристалічних тіл однакова і не залежить від температури. Цей закон, що встановили французькі фізики П. Дюлонг (1785–1838) і А. Пті (1791–1820), виконується для більшості хімічних елементів і простих сполук при температурах вище кімнатної (рис. 9.3). При зниженні температури теплоємність не підкоряється закону Дюлонга і Пті й прямує до нуля пропорційно приблизно T^3 у діелектриках та напівпровідниках і пропорційно T – у металах.

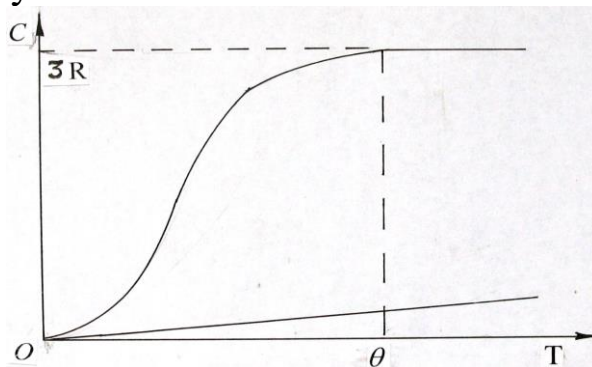


Рис. 9.3

Температура, при якій теплоємність решітки набуває значення $3R$, є характеристичною (для різних речовин) температурою Дебая θ . Для більшості кристалів температура Дебая коливається в інтервалі 100–450 K. Винятками є алмаз ($\theta = 2200$ K), берилій (1000 K), кремній ($\theta = 640$ K), хром (610 K).

Квантова теорія теплоємності Ейнштейна-Дебая враховує взаємну залежність коливань і квантування енергії частинок кристалічної решітки. Згідно з теорією при низьких температурах виморожуються ступені вільності, унаслідок чого теплоємність зменшується.

При температурі Дебая збуджуються всі коливальні ступені вільності і при подальшому збільшенні температури зростає тільки амплітуда коливань атомів. Таким чином, температура Дебая характеризує перехід від квантових властивостей кристалів до класичних.

9.2. Фазові перетворення. Діаграма стану системи

Фазою називають термодинамічний рівноважний стан речовини, що відрізняється за своїми фізичними властивостями від інших можливих рівноважних станів тієї ж речовини. Наприклад, якщо в

закритій посудині перебуває вода – система є двофазною: *рідка фаза* – вода, *газоподібна* – насичена пара. Якщо у воду кинути шматочки льоду, то система стане трифазною.

Фазовий перехід – це перехід речовини з однієї фази в іншу. Фазові переходи першого роду завжди супроводжуються стрибкоподібними змінами об'єму, внутрішньої енергії, ентропії, *поглинанням* або *виділенням* теплоти. Приклад фазового переходу першого роду – *зміна агрегатного стану* речовини (плавлення, кристалізація, кипіння). Фазові переходи другого роду не пов'язані з поглинанням чи виділенням теплоти і зміною об'єму. Вони супроводжуються зміною теплоємності (перехід феромагнетика в парамагнітний стан, металів – у надпровідний, гелію – у надплинний).

Двофазна система перебуває в рівновазі тільки у визначеному інтервалі температур. Рівновагу фаз можна зобразити у вигляді діаграми стану в координатах p - T , де кожному значенню температури відповідає відповідне значення тиску (рис. 9.4).

Крива випаровування відповідає точкам, у яких газ і рідина перебувають у рівновазі, крива плавлення – рівновазі твердого і рідкого станів, крива сублімації – твердої і газоподібної фази.

Усі криві перетинаються в точці, яку називають *потрійною*. Температура і тиск потрійної точки води становлять $T_{nm} = 273,16 \text{ K}$, $p_{nm} = 610 \text{ Па}$.



Рис. 9.4

Зміну температури фазового переходу залежно від зміни тиску описує рівняння Клапейрона-Клаузіуса:

$$\frac{dT}{dp} = \frac{T(V_2 - V_1)}{\lambda}, \quad (9.20)$$

де $(V_2 - V_1)$ – зміна об’єму внаслідок переходу з однієї фази в іншу; T – абсолютна температура; p – тиск.

Доведено, що при зниженні температури у фосфоліпідній мембрані відбувається фазовий перехід першого роду з рідкокристалічного у гель-стан, що відіграє важливу роль у холодостійкості рослин.

Розглянемо деякі фазові перетворення. Більшість твердих тіл є **кристалічними**.

Плавленням називають процес переходу речовини з твердого (кристалічного) стану в рідкий. Плавлення простих речовин відбувається при постійній температурі $T_{пл}$, яку називають *температурою плавлення*. При температурі плавлення тіло перебуває одночасно у твердому і рідкому станах. Уся кількість теплоти Q , що підводиться до твердого тіла при плавленні, іде на руйнування кристалічної решітки, тому тіла плавляться при постійній температурі (сплави металів плавляться в деякому інтервалі температур).

Питомаю теплотою плавлення λ називають величину, яка чисельно дорівнює кількості теплоти Q , необхідної для переходу одиниці маси m кристалічної речовини в рідкий стан при температурі плавлення ($T_{пл}$):

$$\lambda = \frac{Q}{m}. \quad (9.21)$$

Одиниця виміру питомої теплоти плавлення Дж/кг .

Кристалізацією називається перехід речовини з рідкого у твердий стан. Цей процес проходить при постійній *температурі кристалізації* $T_{\text{крисст}}$, яка дорівнює температурі плавлення $T_{\text{пл}}$.

Питома теплота кристалізації λ дорівнює питомій теплоті плавлення. Процес переходу речовини з рідкого стану в газоподібний називають пароутворенням.

Випаровування – це пароутворення, що відбувається при будь-якій температурі з вільної поверхні рідини. Молекули, які вилітають при випаровуванні, називають паром цієї рідини. Випаровування з твердого стану називається **сублімацією**.

При випаровуванні вилітають молекули, які мають найбільшу кінетичну енергію, тому речовина охолоджується. Якщо випаровування проходить у закритій посудині, то через якийсь час настає **динамічна (рухлива) рівновага** між процесами випаровування і конденсації. **Конденсація** – процес перетворення пари на рідину. При рівновазі кількість молекул, які переходять у пару, дорівнює кількості молекул, які переходять з пари у рідину.

Насичуючим (насиченим) паром називають пару, що перебуває в динамічній рівновазі зі своєю рідиною.

Кипіння – це процес інтенсивного пароутворення не тільки з вільної поверхні, але й з усього об'єму рідини. Рідина випаровується в бульбашки пари, утворені при кипінні.

Температурою (точкою) кипіння називається температура рідини, при якій тиск її насиченої пари (p_H) незначно перевищує зовнішній тиск p :

$$p_H \geq p + \frac{2\sigma}{R}. \quad (9.22)$$

Питомою теплотою паротворення r є величина, чисельно рівна кількості теплоти Q , яка необхідна для перетворення в пару одиниці маси m рідини при температурі кипіння:

$$r = \frac{Q}{m}. \quad (9.24)$$

Одиниця вимірювання питомої теплоти паротворення – Дж/кг . При зворотному процесі (конденсації) *виділяється та сама кількість теплоти* Q , що і при пароутворенні.

При згорянні палива виділяється теплова енергія. Паливо характеризується *питомою теплотою згорання*:

$$\lambda = \frac{Q}{m}. \quad (9.24)$$

Питома теплота згорання палива чисельно дорівнює кількості теплоти Q , що виділяється при повному згорянні одиниці маси палива. Одиниця виміру λ – Дж/кг.

9.3. Адіабатичний процес. Рівняння Пуассона

Адіабатичним називають термодинамічний процес, який відбувається в системі без теплообміну із зовнішнім середовищем:

$Q = const, \Delta Q = 0$. Застосовуючи перший закон термодинаміки, отримаємо:

$$A = -\Delta U \quad \text{або} \quad \Delta U = -A. \quad (9.25)$$

З формули (9.25) випливає, що адіабатичне розширення газу відбувається за рахунок зменшення внутрішньої енергії газу, а робота зовнішніх сил ($-A$) над системою приводить до збільшення внутрішньої енергії системи. Рівняння адіабатичного процесу (рівняння Пуассона) у координатах p - V має вигляд:

$$pV^\gamma = const, \quad (9.26)$$

де $\gamma = C_p/C_v$.

Використовуючи рівняння Менделєєва-Клапейрона і рівняння адіабати, можна виразити рівняння Пуассона в координатах T - V і p - T :

$$TV^{\gamma-1} = const; \quad p^{1-\gamma}T^\gamma = const. \quad (9.27)$$

Оскільки γ більше одиниці, то крива адіабати в координатах p - V спадає швидше, ніж ізотерми (рис. 9.5).

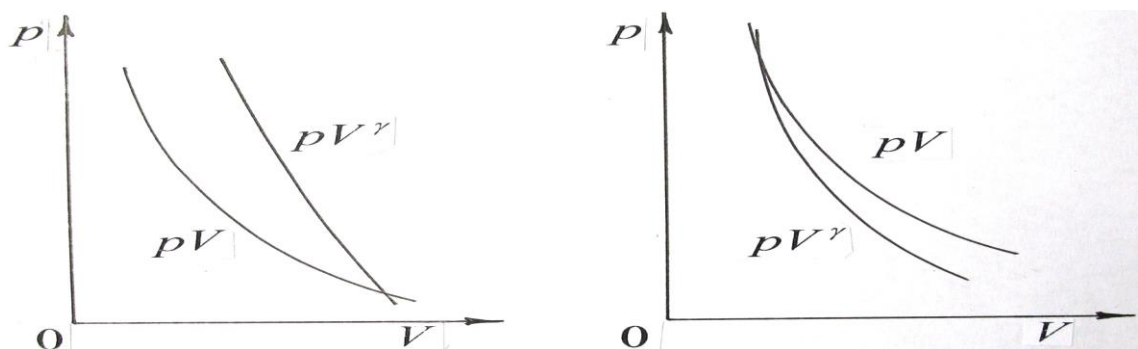


Рис. 9.5

При адіабатичному розширенні газу частина внутрішньої енергії перетворюється на роботу, тобто:

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV = - \int_{T_1}^{T_2} \nu \tilde{C}_V dT = \nu \tilde{C}_V (T_1 - T_2). \quad (9.28)$$

Роботу при адіабатичному розширенні газу можна також знайти за формулою:

$$A = \frac{RT_1}{\gamma - 1} \nu \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma - 1} \right] = \frac{RT_1}{\gamma - 1} \nu \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right) = \frac{p_1 V_1 (T_1 - T_2)}{(\gamma - 1) T_1}. \quad (9.29)$$

9.4. Ефект Джоуля-Томсона. Зрідження газів

Внутрішня енергія ідеального газу визначається кінетичною енергією поступального руху молекул:

$$U_i = \nu C_V T, \quad (9.30)$$

де $\nu = m/M$ – число молів; C_V – молярна теплоємність при постійному об'ємі.

Внутрішня енергія реального газу визначається тако від'ємною потенціальною енергією взаємодії молекул і залежить від об'єму газу:

$$U_i = \nu C_V T - \nu^2 \frac{a}{V}. \quad (9.31)$$

Дослідники Д. Джоуль (1818–1889 рр.) та У. Томсон (1824–1907 рр.) виявили, що при адіабатичному розширенні реального газу через пористу перегородку з перепадом тисків (дроселюванні) він нагрівається або охолоджується. Ефект Джоуля-Томсона використовують для зрідження газів. Низькі температури і зріджені гази широко застосовують у науці, техніці, медицині, сільському господарстві.

У кінці минулого століття виникла кріобіологія – наука, що вивчає дію низьких температур на живі організми і рослини, способи захисту живих клітин при заморожуванні та ін. Живі клітини рослин і тварин гинуть при охолодженні, що зумовлено руйнуванням мембрани клітин унаслідок утворення льоду всередині клітини. Для зберігання тривалий час при низьких температурах крові, живих біологічних тканин, фрагментів нирок і кісток, хрящової та нервової

тканини застосовують кріопротектори (гліцерин, гліколі) та охолодження з великою швидкістю (до 1000 К/с).

9.5. Теплова машина. Другий закон термодинаміки

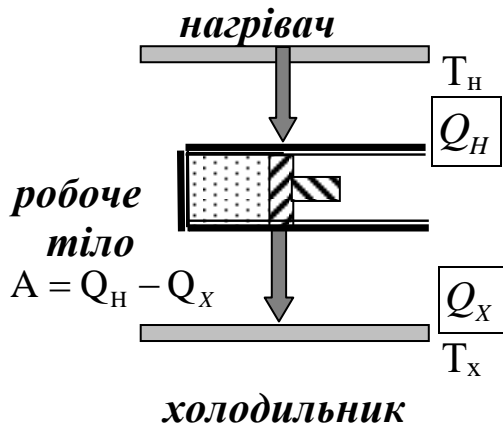


Рис. 9.6

Тепловою машиною називають пристрій, у якому енергія палива, що виділяється при його згорянні, перетворюється на механічну роботу. Теплова машина складається з трьох основних частин: **нагрівача, робочого тіла і холодильника** (рис. 9.6). Робоче тіло одержує від нагрівача кількість теплоти Q_H і виконує корисну роботу A_k .

Проаналізуємо роботу теплової машини: вона працює циклами; в основі лежать декілька процесів; частина тепла передається холодильнику.

Коефіцієнт корисної дії теплової машини (теплового двигуна) обчислюють за формулою:

$$\eta = \frac{A_k}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_X}{Q_H} = 1 - \frac{Q_X}{Q_H}, \quad (9.32)$$

де $A_k = Q_H - Q_X$ – корисна робота, що виконує робоче тіло.

У 1824 р. французький військовий інженер Саді Карно (1796–1832) довів, що найекономічнішими є теплові машини, цикл яких складається з двох ізотерм T_H і T_X та двох адіабат 1–4 і 2–3 (рис. 9.7).

Визначимо коефіцієнт корисної дії (ККД) циклу Карно. На ділянці 1–2 газ розширюється ізотермічно ($\Delta U = 0$), тому робота газу дорівнює кількості отриманої теплоти Q_H :

$$A_{12} = Q_H = \nu RT_H \ln \frac{V_2}{V_1}. \quad (9.33)$$

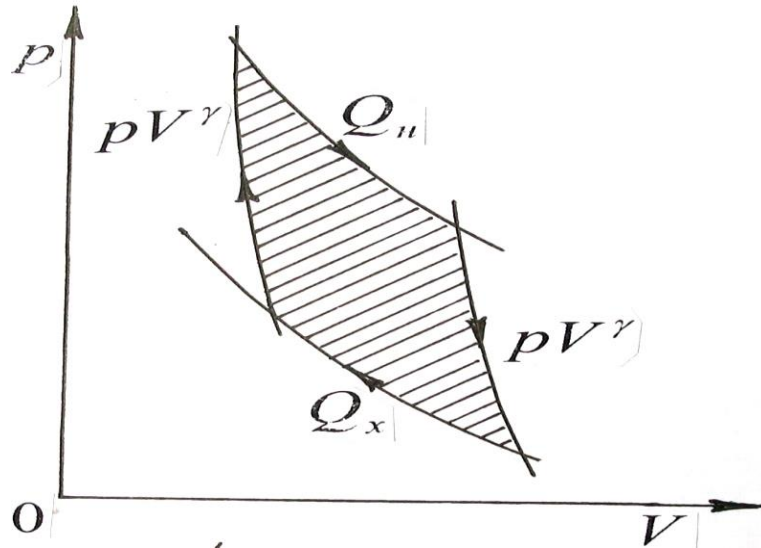


Рис. 9.7

На ділянці 3–4 газ стискується ізотермічно і віддає теплоту Q_x :

$$A_{34} = -Q_x = \nu RT_x \ln \frac{V_3}{V_4}. \quad (9.34)$$

При адіабатичному розширенні ділянки 1–2 і стисненні ділянки 3–4 робота однакова, але різна за знаком, тому не вносить зміни в баланс теплоти і ККД циклу Карно:

$$\eta = \frac{Q_H - Q_x}{Q_H} = \nu R \frac{T_H \ln \frac{V_2}{V_1} - T_x \ln \frac{V_3}{V_4}}{T_H \ln \frac{V_2}{V_1}}. \quad (9.35)$$

Точки 1, 2, 3, 4 одночасно належать ізотермам та адіабатам, тому рівняння адіабат має вигляд:

$$T_H V_2^{\gamma-1} = T_x V_3^{\gamma-1}, \quad T_H V_1^{\gamma-1} = T_x V_4^{\gamma-1}. \quad (9.36)$$

Поділивши почленно перший вираз на другий, отримаємо:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{V_3}{V_4}. \quad (9.37)$$

Підставивши (9.37) у формулу (9.35), отримаємо:

$$\eta = -\frac{T_H - T_x}{T_H} = 1 - \frac{T_x}{T_H}. \quad (9.38)$$

Теорема Карно: коефіцієнт корисної дії η_i ідеального теплового двигуна, що працює за циклами Карно, не залежить від

природи робочого тіла і визначається тільки температурами нагрівача T_n і холодильника T_x ; ККД машини, яка працює циклами Карно, завжди більше ККД будь-якої реальної машини $\eta_i > \eta$.

Тепловими двигунами є: парові машини, парові й газові турбіни, реактивні двигуни, двигуни внутрішнього згоряння і т. ін. Сучасні теплові машини працюють на базі різних процесів: цикл бензинового двигуна складається з двох адіабат і двох ізохор (рис. 9.8, а); цикл дизеля складається з двох адіабат, ізобари та ізохори (рис. 9.8, б).

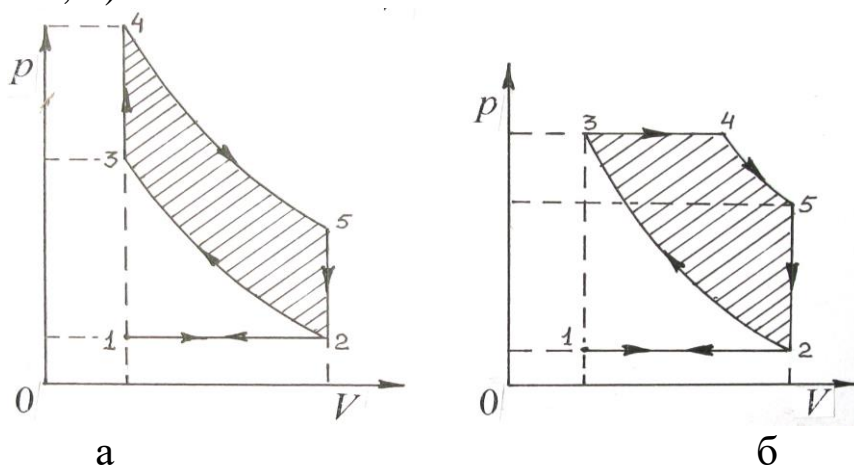


Рис. 9.8

З формули (9.38) видно, що в корисну роботу перетворюється тільки частина підведеної до робочого тіла теплоти. Близько 90 % потужностей у світі припадає на двигуни внутрішнього згоряння. Після згорання палива, окрім теплового забруднення, з вихлопними газами виділяється до 200 різних хімічних речовин, у тому числі канцерогенних. Основним забруднювачем є свинець, який у вигляді тетраетилсвинцю додають до бензину для збільшення октанового числа. У вихлопних газах за наявності надлишку кисню зростає концентрація NO. Цю проблему частково вирішує повторне введення частини вихлопних газів до нової порції пальної суміші. Дизельне пальне містить більшу кількість сірки, яка при згорянні утворює оксиди. Сірка при взаємодії з водяною парою спричиняє утворення сірчаної кислоти.

Другий закон термодинаміки сформульовано на підставі аналізу роботи теплової машини.

Формулювання Кельвіна-Планка: *неможливо здійснити пристрій, що працює циклами, дія якого зводилась би тільки до виконання роботи за рахунок тепла, отриманого від нагрівача.*

Формулювання Клаузіуса: *неможливо здійснити пристрій, що працює циклами, дія якого зводилась би до переносу тепла від холодного тіла до нагрітого без виконання роботи.*

9.6. Ентропія та її статистична інтерпретація

Коефіцієнт корисної дії теплової машини, яка працює за оборотним циклом Карно, визначають за формулою:

$$1 - \frac{Q_x}{Q_n} = 1 - \frac{T_x}{T_n}. \quad (9.39)$$

Запишемо цей вираз у такій формі:

$$\frac{Q_n}{T_n} + \left(-\frac{Q_x}{T_x} \right) = 0. \quad (9.40)$$

Зведеною кількістю теплоти називають фізичну величину, яка визначається відношенням кількості теплоти, одержаної при сталій температурі, до температури, при якій відбувається теплопередача. Для реального нестатичного необоротного процесу зведена кількість теплоти менше нуля:

$$\frac{Q_n}{T_n} + \left(-\frac{Q_x}{T_x} \right) < 0. \quad (9.41)$$

Вирази (9.40) і (9.41) отримано німецьким фізиком Клаузіусом (1822–1888). Перейшовши до замкненого циклу, який можна отримати при проходженні нескінченно великої кількості елементарних циклів, отримаємо нерівність Клаузіуса в загальному вигляді, тобто математичний запис другого закону термодинаміки: *сумарна зведена кількість теплоти при оборотному квазістатичному процесі дорівнює нулю, а при нестатичному – менше нуля.*

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0, \quad (9.42)$$

де δQ – прирощення кількості теплоти (кількість отриманої теплоти не характеризує однозначно термодинамічну систему, тобто не є функцією стану системи).

Функція стану термодинамічної системи S , прирощення якої dS (ΔS) дорівнює зведеній теплоті, отриманій при сталій температурі у квазістатичному процесі, називається ентропією:

$$dS = \frac{\delta Q^{кв.ст.}}{T}; \quad \Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q^{кв.ст.}}{T}. \quad (9.43)$$

Ентропія не залежить від шляху переходу, а визначається лише початковими і кінцевими параметрами стану. З формул (9.42) і (9.43) випливає, що зміна ентропії більше (необоротний процес) або дорівнює (оборотний процес) нулю:

$$dS \geq 0. \quad (9.44)$$

Якщо замкнена система не обмінюється енергією з довкіллям, то $\delta Q = 0$ і за будь-яких процесів $\Delta S = S_2 - S_1 = 0$.

Згідно з другим законом термодинаміки усі процеси відбуваються у напрямі зростання ентропії, тобто такий процес є найімовірнішим. На основі статистичного аналізу термодинамічних процесів Л. Больцман установив зв'язок між ентропією та ймовірністю стану, який називають законом Больцмана:

$$S = k \ln \Omega, \quad (9.45)$$

де Ω – термодинамічна ймовірність стану, який має ентропію S ; k – стала Больцмана.

Термодинамічну ймовірність розраховують за формулою:

$$\Omega = \frac{Z!}{N!(Z - N)!}, \quad (9.46)$$

де Z – кількість можливих станів; N – кількість частинок.

З формул (9.45) і (9.46) випливає, що найбільшу термодинамічну ймовірність має рівноважний стан, (найменш упорядкований).

9.7. Живі організми як відкриті нерівноважні системи

Закони термодинаміки поширюються і на біологічні структури. Усі біологічні об'єкти для підтримки життя вимагають надходження, зберігання і перетворення енергії. Рослини одержують енергію від сонця і накопичують її в процесі фотосинтезу у формі енергії хімічних зв'язків органічних речовин. Усі процеси перетворення енергії в рослинах і тваринах проходять у межах термодинамічних принципів. Ізольованих термодинамічних систем у реаль-

них умовах не існує, але поняття ізольованої системи використовують для розуміння головних термодинамічних принципів.

Живий організм перебуває в нерівноважному стані. Його енергія запасена у вуглеводах і жирах їжі. З'єднуючись з киснем, вуглеводи утворюють воду і вуглекислий газ, вивільнюючи енергію. У біологічних системах процеси відбуваються при сталому тиску, тобто перший закон термодинаміки має вигляд:

$$\delta Q = dU + pdV = d(U + pV), \quad (9.47)$$

де величину $U + pV = H$ називають ентальпією системи.

Таким чином, у біологічних системах вивільнену в хімічних реакціях теплоту визначають зміною ентальпії $\delta Q = dH$.

Зміст ентропії біологічних систем значно ширший, ніж поняття ентропії в газових процесах. Американський учений російського походження, лауреат Нобелівської премії (1977) Ілля Пригожин (1917–2003) розробив теорію нерівноважних систем. Згідно з теорією Пригожина, зміна ентропії у відкритій системі dS складається з двох компонентів: виробництва ентропії в системі внаслідок незворотних процесів dS_e , і її зміни dS_s у результаті взаємодії між системою і навколишнім середовищем. Згідно з другим законом термодинаміки перший компонент завжди позитивний. Другий компонент може бути і позитивним, і негативним залежно від напрямку енергетичного обміну через границю системи. Швидкість зміни загальної ентропії відкритої біологічної системи дорівнює:

$$\frac{dS}{dt} = \frac{dS_e}{dt} + \frac{dS_s}{dt}. \quad (9.48)$$

У стаціонарному стані $S = const$, $dS = 0$, $\frac{dS}{dt} = 0$. Це означає, що для стаціонарного випадку:

$$\frac{dS_e}{dt} = -\frac{dS_s}{dt}. \quad (9.49)$$

Швидкість зміни ентропії всередині системи дорівнює швидкості її зміни внаслідок взаємодії організму із зовнішнім середовищем.

Відповідно до теореми Пригожина, *у системі, яка перебуває в стаціонарному стані за незмінних зовнішніх умов, швидкість зростання ентропії за рахунок внутрішніх необоротних процесів приймає мінімальне, відмінне від нуля, додатне значення:*

$$\frac{dS_g}{dt} \Rightarrow \min . \quad (9.50)$$

При відхиленні системи від стаціонарного стану наростають процеси, які намагаються повернути її в стан до мінімуму ентропії. У ході необоротних процесів перетворення та дисипації (розсіяння) енергії у багатокомпонентній системі можуть виникати структури, не властиві для стану термодинамічної рівноваги – процеси самоорганізації. Галузь науки, що вивчає загальні закономірності в макроскопічних системах, називають синергетикою.

9.8. Вплив теплових факторів на живі організми

Екологічний фактор – будь-який фактор навколишнього середовища, здатний прямим або непрямим способом впливати на живі організми. Відсутність якогось фактора у визначений період існування може гальмувати процес відтворення (відсутність належних умов може призупинити розвиток, отже, організм не розмножується) або спричиняє зупинку росту (рослини проростають тільки за визначеної сукупності факторів). Серед кліматичних особливе місце займають екофактори, що мають концентрований вплив, екологи виділяють їх як головні кліматоутворюючі екофактори. До них належать: енергія сонця, освітленість, температура, вологість, газовий склад атмосфери, тиск.

Температура – один з найважливіших факторів, який впливає на живі організми і рослини. Цей кліматичний чинник істотно визначає швидкість біохімічних реакцій у клітинах, впливаючи на більшість фізіологічних процесів від проходження нервових імпульсів до травлення. Дуже високі або низькі температури згубні для організму. Висока температура руйнує біополімери, білки крові людини денатурують уже при 41–42 °С.

Гіпертермія – стан, при якому температура людини вища за 37 °С. Виникає, коли утворене в організмі тепло не встигає виходити за його межі, що призводить до перегрівання тіла. За цих умов організм максимально мобілізує механізми тепловіддачі – у людини це, головним чином, випаровування поту і меншою мірою посилення вентиляції легень. Одночасно розширюються кровоносні судини шкіри. Гіпертермія призводить до теплового удару.

Гіпотермія (переохолодження) – стан організму, при якому температура тіла падає нижче необхідної для підтримки нормаль-

ного обміну речовин і функцій організму. У людини це $+35,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ та нижче. Під впливом холоду організм не в змозі поповнювати втрачені теплоту, виникає обморожування. Швидкість обміну речовин в організмі знижується, що призводить до зменшення потреби в кисні. Ця обставина використовується у медичній практиці, застосовуючи штучну місцеву або загальну гіпотермію для лікування кровотеч, травм, при операціях на серці.

У зв'язку з сезонними змінами клімату істотам наділені властива акліматизація – можливість змінювати межі витривалості. Восени морозостійкість рослин поступово підвищується завдяки накопиченню в клітинах вуглеводів. Весною вона різко знижується, і в разі заморозків рослини можуть загинути. У тварин при акліматизації до зими міняється шерстяний або пір'яний покрив, збільшується жировий прошарок, запасається бурий жир. У теплу пору року вмикаються фізіологічні механізми, що захищають від перегріву. Збільшується кількість випарів через покриви і дихальну систему. Деякі комахи, пустинні гризуни і черепахи з настанням жаркого періоду впадають у літню сплячку. Птиці та ссавці мають механізм терморегуляції, тому здатні переносити значні перепади температур. Комахи, плазуни, багато звірів і рослин з настанням осені переходять у стан зимового спокою. Для захисту від переохолодження кількість води в їхніх організмах знижується, накопичуються вуглеводи і гліцерин. Обмін речовин, частота серцевих скорочень сповільнюється. У трав'яних рослин зимують насіння, кореневі системи. Кліщі, малярійні комарі, мухи і багато метеликів зимують у стадії дорослої особини, а непарний шовкопряд і різні види тлі – у стадії яйця.

Деякі істоти здатні до анабіозу – практично повної зупинки обміну речовин. Організм повністю зневоднюється, клітини висихають, змінюють форму, але їхня внутрішня будова не порушується. При відновленні сприятливих умов життєдіяльність відновлюється. Мухи, коловертки і нематоди витримують тривалі пониження температури до $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$. У стані анабіозу енергія витрачається гранично економно, різко підвищується стійкість організму.

Підтримка нормальної життєдіяльності в несприятливих умовах вимагає від істот великих витрат енергії. Види, що мешкають у високих широтах, найбільш пристосовані до перепадів температур. Тундрові песці переносять коливання температур від $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до

-55 °С. Тварини і рослини тропічних лісів пристосовані лише до невеликого діапазону температур, зниження температури до +5 °С для них згубне. Окремі види бактерій і водоростей добре переносять температуру гарячих джерел до 123 °С.

У воді, завдяки її високій теплоємності, коливання температури істотно менші, ніж на суші. Тому водні види менш пристосовані до перепадів температур. Діапазон пристосованості деяких видів антарктичних риб становить усього 4 °С (від -2 °С до +2 °С).

У популяціях теплокровних тварин з просуванням на північ зменшуються частини, що виступають, і збільшуються середні розміри тіла. Наприклад, маса європейського бурого ведмеда 150–280 кг, а ведмеда Аляски – близько 800 кг. Річ у тому, що тепловтрати пропорційні площі поверхні тіла, їх питома величина падає зі збільшенням об'єму тварини. У лапах китів і лапах птахів вени розташовані впритул до артерій. Тепло артерій передається венам і повертається в тіло, температура кінцівок і тепловтрати різко знижуються.

Співтовариства наземних організмів характеризуються широтною зональністю – зміною видів при просуванні від екватора до полюсів. Вологі тропічні ліси переходять у субтропіки і далі в листяний ліс помірного клімату й низькорослу тундрову рослинність. В арктичних рослин переважають форми, що стелються, їх листя часто підвшкоподібне. Завдяки такій конфігурації рослини уловлюють більше сонячного світла і максимально використовують тепло нагрітого ґрунту. Гірські ланцюги і басейни великих річок сприяють проникненню теплолюбивих видів далеко на північ. Гори захищають від холодних вітрів, а водні маси служать резервуаром тепла, що підвищує середню температуру ґрунту і повітря. Вода має велику теплоємність, запасає тепло і тривалий час зігріває довкілля. Створюваний мікроклімат формує цікаве поєднання видів, деколи не характерних для певного біому.

9.9. Фізичні механізми терморегуляції

Для контролю за температурними змінами на кожній поверхні та внутрішніх органах розташовані ***терморегулятори***. Розрізняють холодкові (колбочки Краузе) і теплові (тільця Руффіні) з інтервалами чутливості 28–38 °С і 35–43 °С відповідно. Шкіра дуже чутлива до різких змін температури в інтервалі 32 – 42 °С, однак якщо темпе-

ратура незмінна, то активність рецепторів незначна. За межами цього діапазону виникає відчуття холоду або тепла. Рецептори знаходяться в товщі шкіри й утворюють мозаїку теплових і холодних плям діаметром близько 1 мм. Терморекцептори мають спонтанну імпульсацію за нормальної температури тіла, тобто одночасно активні теплові й холодні терморекцептори. При нагріві припиняється імпульсація холодних рецепторів, а при охолодженні – теплових. Дія теплових рецепторів зупиняється при збільшенні температури вище 45°C , тому вони не сигналізують про біль у разі сильного нагріву.

Контрольні запитання

1. Що вивчає термодинаміка?
2. Що називають термодинамічною системою?
3. Які параметри характеризують термодинамічні системи?
4. Що називають внутрішньою енергією термодинамічної системи?
5. Як розрахувати внутрішню енергію ідеального газу?
6. Яким способом ще можна змінити внутрішню енергію системи?
7. За якою формулою можна розрахувати зміну внутрішньої енергії термодинамічної системи?
8. Що називають питомою теплоємністю речовини?
9. Що називають молярною теплоємністю речовини?
10. Запишіть формулу Майєра.
11. Чому дорівнює внутрішня енергія твердого тіла?
12. Запишіть формулу закону Дюлонга і Пті.
13. Сформулюйте перший закон термодинаміки.
14. Застосуйте перший закон термодинаміки до ізопроцесів у газах.
15. Що називають фазою? Наведіть приклади.
16. При яких фазових переходах поглинається і виділяється тепло?
17. Чому під час снігопаду температура повітря підвищується?
18. Чому плавець, що вийшов з води, відчуває холод?
19. Який процес називають адіабатичним?
20. Запишіть рівняння Пуассона.
21. Що називають тепловим двигуном? Назвіть основні частини теплового двигуна.
22. Запишіть формулу ККД теплового двигуна.
23. Наведіть приклади теплових двигунів.

24. Що таке ентропія? Чому в реальних процесах ентропія зростає?
25. Запишіть формулу закону Больцмана.
26. Що таке термодинамічна ймовірність?
27. Сформулюйте теорему Пригожина.

10. ВЛАСТИВОСТІ ҐРУНТУ

10.1. Механічні властивості ґрунтів

Земля – це поняття, що включає в себе ґрунт, рельєф місцевості, клімат і водний режим ґрунту. Процес ґрунтоутворення почався із зародженням життя на Землі. При однакових кліматичних умовах і на однаковій материнській породі під трав'янистою рослинністю утворилися типові чорноземи, а під деревиною – сірі лісові ґрунти.

На процес утворення ґрунтів впливають такі природні фактори: материнська порода, механічний і хімічний склад, кліматичні умови, рельєф місцевості, склад рослинності та її біологічна продуктивність, кількість органічних залишків і швидкість їх розкладання.

10.2. Механічний склад ґрунту

Материнська порода внаслідок вивітрювання руйнується і подрібнюється до частинок різного розміру. Частинки, близькі за розмірами, утворюють фракції. *Співвідношення в ґрунті механічних елементів (фракцій) називають механічним складом ґрунту.* Механічний склад ґрунту впливає на фізичні, хімічні та агрохімічні його властивості (пористість, вологоємність, водо- і повітропроникність, вбирну здатність, уміст і доступність поживних речовин).

За механічним складом ґрунти бувають: глинисті (важкі, середні, легкі), суглинкові (важкі, середні, легкі), супіщані, піщані зв'язані, піщані пухкі. Піщані ґрунти швидко вбирають вологу, але погано її утримують, тому на них рослини потерпають від ґрунтової посухи. Але такі легкі ґрунти легше обробляти. Важкі глинисті ґрунти багаті на поживні речовини, але завжди ущільнені, погано пропускають вологу і повітря. Вони чинять опір машинам, що обробляють ґрунт, особливо в сухому стані. Агрономічно найціннішими є легко- та середньосуглинкові ґрунти, для яких добрий повітряний і водний режими.

Органічна частина ґрунту складається з органічних решток рослинного і тваринного походження, а також продуктів їх розкладу. Рослинні рештки мікроорганізми розкладають на простіші органічні сполуки. Деяка частина проміжних продуктів розкладу перетворюється на специфічні складні високомолекулярні колоїдні речовини – гумус. Більшу частину (85–90 %) органічних речовин ґрунту складає гумус, який в основному і визначає властивості й родючість ґрунту. Гумус склеює і цементує механічні частинки в структурні, поліпшує водно-повітряний і тепловий режим ґрунту. Він сприяє нагромадженню у верхніх шарах елементів живлення як самого ґрунту, так і таких, що вносять з добривами. Повільно розкладаючись, гумус забезпечує рослини доступними сполуками азоту і зольними елементами. У ґрунтах з достатньою кількістю гумусу найсприятливіші умови для розвитку рослин і ґрунтових мікроорганізмів.

Гумус є основним показником родючості ґрунтів. Загальні запаси гумусу в метровому шарі різних типів ґрунтів складають від 80 до 760 т/га. Уміст гумусу в ґрунті змінюється, і одним з основних завдань землеробства є зберігання, і збільшення його за допомогою внесення органічних добрив, правильного добору культур і їх чергування, обробітку ґрунту тощо.

10.3. Структура та фізико-механічні властивості ґрунту

ґрунт утворює агрегати певної форми і розміру. Структура ґрунту – один з основних факторів його родючості. Агрегати ґрунту бувають різного діаметра: 0,25 мм (мікроструктура), 0,25–10 мм (макроструктура), понад 10 мм (бриласта структура). За формою структура може бути грудочкуватою, горіховатою, зернистою, стовпчастою, призматичною, пластинчатою. Агрономічно найціннішою є зерниста структура з розміром агрегатів від 1 до 10 мм і стійка проти розмивання водою. Така структура надає ґрунту пухкого складу, що полегшує проростання насіння і розростання коренів.

Властивості ґрунту залежать від механічного, мінералогічного, хімічного і структурного складу.

Питома маса – це відношення маси твердої фази ґрунту до маси води при 4 °С. Вона залежить від мінерального складу ґрунту, умісту в ньому органічних речовин і коливається від 1,4 до 2,8.

Об'ємна маса – маса (в грамах) 1 см³ абсолютно сухого ґрунту з непорушною будовою (разом з ґрунтовими порами). Вона

завжди менша за питому масу і є показником пухкості ґрунту. У мінеральних ґрунтів вона становить 0,9–1,8, у болотних і торф'яниках – 0,15–0,4 г/см³.

Пористість ґрунту – це загальний об'єм усіх пор і проміжків між ґрунтовими частинками і структурними агрегатами, виражена у відсотках від загального його об'єму в непорушеному стані.

Пластичність – здатність ґрунту в зволоженому стані зберігати надану йому форму.

Липкість – це здатність ґрунту прилипати до інших тіл, у т. ч. і до знарядь обробітку. Ґрунти, насичені кальцієм, мають найменшу липкість, а натрієм – найбільшу. У глинистих ґрунтів липкість найбільша. При більшій вологості ґрунту підвищується його липкість.

Набухання – здатність ґрунту збільшувати об'єм при зволоженні. Це явище властиве ґрунтам, що містять багато органічних речовин (торфові), насичені натрієм (солонці), а також важким глинистим ґрунтам.

Осідання ґрунту – процес, протилежний набуханню, спостерігається під час висихання ґрунтів.

Зв'язність ґрунту – здатність ґрунту чинити опір зовнішнім механічним зусиллям роз'єднати його частинки розриванням, здавлюванням тощо. Визначають опір ґрунту величиною питомого опору (кг/см²), що показує, яку силу потрібно прикласти в перерахунок на 1 см², щоб підрізати і перевернути шар землі. У різних ґрунтів він коливається від 0,2 до 1,2 кг/см².

10.4. Тепловий режим ґрунту

Теплоємність ґрунтів. Питома теплоємність дорівнює кількості тепла, необхідного для зміни температури одиниці маси ґрунту на 1 °С за відсутністю фазових переходів води. Теплоємність ґрунтів визначають за теплоємністю їх твердих, рідких та газоподібних складових. Теплоємність твердої компоненти ґрунтів визначають за мінералогічним складом і змістом органічних речовин. Вона становить 0,12–0,25 кал/г·град. Теплоємність органічних речовин значно більша, ніж мінеральних, тому найбільша вона в торфу і ґрунту багатого гумусом. Теплоємність ґрунтів залежить також від наявності глинистих часток. При більшому вмісті глини

теплоємність ґрунту зростає. При невеликих змінах температури і тиску значення питомої теплоємності приймають за постійне.

Коефіцієнт теплопровідності ґрунтів, які є багатокомпонентними системами, визначають співвідношенням твердої, рідкої та газової складових, хіміко-мінералогічним складом, структурними і текстурними особливостями ґрунту (дисперсністю, пористістю, слоїс-тістю та ін.), його вологістю, агрегатним станом води і температури. Теплопровідність більшості мінералів коливається від 0,001 до

0,009 $\text{кал} / \text{см} \cdot \text{с} \cdot \text{град}$. Теплопровідність води дорівнює 0,0014 $\text{кал} / \text{см} \cdot \text{с} \cdot \text{град}$, льоду – близько 0,0050 $\text{кал} / \text{см} \cdot \text{с} \cdot \text{град}$, повітря – 0,00005 $\text{кал} / \text{см} \cdot \text{с} \cdot \text{град}$. Наведені значення пояснюють залежність теплопровідності ґрунтів від їх співвідношення. Теплопровідність зростає зі збільшенням вологості й зменшенням пористості.

Температуропровідність ґрунтів характеризує швидкість зміни температури внаслідок поглинання або віддачі тепла. Її оцінюють коефіцієнтом температуропровідності, який чисельно дорівнює теплопровідності ґрунту з об'ємною теплоємністю, що дорівнює одиниці. Температуропровідність ґрунтів залежить від співвідношення твердої, рідкої та газової складових, мінералогічного складу, структурних особливостей ґрунту, вологості, агрегатного стану води і температури. Температуропровідність великою мірою визначає глибину добових та годових коливань температури у поверхневій частині ґрунту.

10.5. Теплове забруднення води

Температура води, яку використовують на теплових і атомних електростанціях для охолодження, підвищується в середньому на 7°C , після чого цю воду скидають безпосередньо в ріки й озера, адже вона є основним джерелом додаткового тепла. Щільність і в'язкість нагрітої води відрізняються від властивостей холоднішої води басейну, що її приймає, тому вони перемішуються поступово. Тепла вода охолоджується або навколо місця зливу, або в змішаному потоці. Потужні електростанції помітно нагрівають води в річках і бухтах, на яких вони розташовані. «Теплове забруднення» зменшує розчинність кисню у воді, прискорює темпи хімічних реа-

кцій і, отже, впливає на життя тварин і рослин у водоприймальних басейнах.

Існують приклади того, як у результаті підвищення температури води гинули риби, виникали перешкоди на шляху їх міграцій, швидкими темпами розмножувалися водорості й інші нижчі сміттеві рослини, відбувалися несвоєчасні сезонні зміни водного середовища. Однак у деяких випадках підвищення температури води має сприятливі екологічні наслідки.

10.6. Вимірювання температури

Температура – скалярна фізична величина, яка характеризує середню кінетичну енергію частинок макроскопічної системи, що припадає на один ступінь вільності. Поняття температури інтуїтивно зрозуміле, як стан тепла й холоду, але її вимірювання є методологічно складною проблемою. Температуру неможливо виміряти безпосередньо. Проте при нагріванні або охолодженні тіла змінюються його фізичні властивості: довжина та об'єм, густина, пружні властивості, електропровідність тощо. Основою для вимірювання температури може бути зміна будь-якої властивості тіла, якщо відома його залежність цієї властивості від температури.

Прилади для вимірювання температури класифікують залежно від методу вимірювання: **термометри** для вимірювання контактним способом; **пірометри** – неконтактним.

Дія **газового термометра** ґрунтується на залежності тиску (при сталому об'ємі) від температури згідно із законом ідеального газу. Такі прилади використовують рідко.

Дія **рідинного термометра** базується на тепловому розширенні рідини. Робочою рідиною в подібних термометрах є ртуть, спирт або толуен. Діапазон температур, у межах якого можливе застосування ртуті, становить від $-38,8$ до $+56,9$ °С. При вимірюванні низьких температур перевагу має спирт ($-117,3...+78,5$ °С) або толуен ($-95,1...+110,5$ °С).

Дія **оптичного пірометра** ґрунтується на використанні залежності випромінювальної здатності розжареного тіла від температури. Найпоширенішими, особливо в промислових вимірюваннях, є **пірометри зі зникаючою ниткою**. Схему пірометра зі зникаючою ниткою ОППР-017, що має власне коло електричного живлення зображено на рис. 10.1.

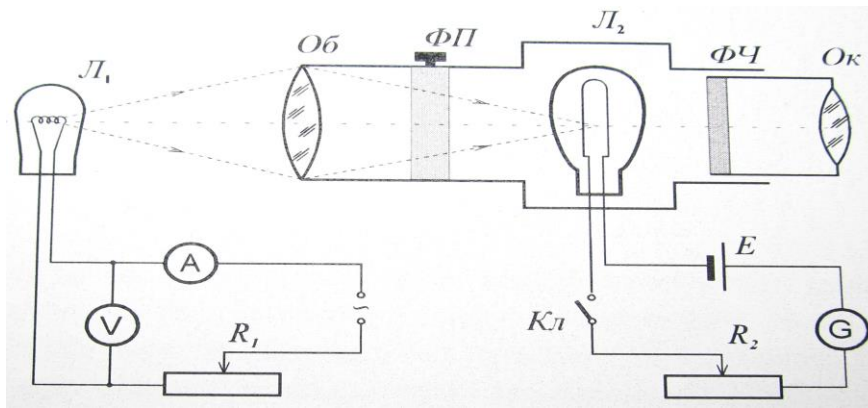


Рис. 10.1.

На схемі пірометра:

1 – витяжний тубус об'єктива (Об); 2 – корпус; 3 – поворотна ручка поглинального фільтра (ФП); 4 – поворотне кільце (движок реостата пірометра) R_2 ; 5 – напрямна трубка тубуса об'єктива; 6 – поворотна обойма червоного світлофільтра (ФЧ); 7 – витяжний тубус окуляра (Ок); 8 – кожух рукоятки.

За допомогою тубуса об'єктива Ок зображення світної нитки лампи розжарювання L_1 суміщається в одній площині з ниткою розжарення еталонної лампи L_2 , розташованої у фокальній площині об'єктива Об пірометра. Обидві нитки розглядають через окуляр Ок.

За допомогою цих пірометрів визначення температури базується на безпосередньому порівнянні яскравості випромінювання тіла в певній області спектра з яскравістю еталонного джерела в тій самій області.

Еталонне джерело світла попередньо градуйоване за випромінюванням абсолютно чорного тіла. Визначену таким чином температуру називають яскравісною. **Яскравісна температура** довільного нечорного тіла – це така температура, яку воно мало б, випромінюючи у цій спектральній області як абсолютно чорне тіло, тобто вона завжди нижча за дійсну температуру тіла, тому вводять поправки.

Дія **термометрів опору** ґрунтується на властивості провідників (терморезистори) і напівпровідників (термістори) змінювати елек-тричний опір під впливом температури.

Дія **термоелектричного термометра** базується на ефекті Зеєбека – виникненні електрорушійної сили (ЕРС) в електричному колі, що складається з послідовно з'єднаних різнорідних провідників (термопара), контакти яких мають різну температуру.

Дія **біметалевого термометра** ґрунтується на тепловому розширенні твердих тіл, зокрема на деформації біметалевої пластини (наприклад, інвар і сталь) під впливом температури.

Радіотермометри використовують для вимірювання температури природних поверхонь. На практиці вимірюють енергетичну яскравість у смузі довжин хвиль в інтервалі 8...13 мкм, де спостерігається вікно прозорості атмосфери, а випромінювальна здатність тіл максимальна. Радіометри складаються з оптичної системи (лінзи, дзеркала, фільтри), що фокусує потік випромінювання на детектор.

Кварцовий п'єзоелектричний термометр – цифровий прилад, в основі дії якого лежить вимірювання резонансної частоти п'єзокристала. Прилади такого типу характеризуються високою чутливістю і роздільною здатністю (10^{-4} °C). Діапазон температур, що вимірюють, становить від -40 до $+230$ °C.

Контрольні запитання

1. Які прилади використовують для вимірювання температури неконтактним методом?
2. Чим характеризуються теплофізичні характеристики ґрунту?
3. Чим визначають теплоємність, теплопровідність ґрунту?
4. Чим визначають температуропровідність ґрунту?
5. Що таке теплове забруднення води?
6. Який принцип дії пірометра зі зникаючою ниткою.
7. Який принцип дії термометра опору?
8. Який принцип дії термоелектричного термометра?
9. Який принцип дії біметалевого термометра?
10. Який принцип дії радіотермометра?
11. Який принцип дії кварцового п'єзоелектричного термометра?

Навчальне видання

Рохманов Микола Якович
Авотін Станіслав Сергійович

ФІЗИКА З ОСНОВАМИ БІОФІЗИКИ

Навчальний посібник

За загальною редакцією
С.С. Авотіна

Редактори: А.М. Чорна, А.І. Осика
Коректор І.О. Бутильська
Комп'ютерний набір і верстка – С.С. Авотін

Підпис. до друку 16.03.2020. Формат 60x84/16. Обсяг: 16,7 ум.-друк. арк.;
17,4 обл.- вид. арк. Тираж 300. Замовлення №

Виробник – редакційно-видавничий відділ Харківського національного аграрного університету ім. В.В. Докучаєва, 62483, Харківська обл., Харківський р-н, п/в «Докучаєвське-2», навчальне містечко, тел. 99-72-70. E-mail:
office@kнау.kharkov.ua

Виготовлювач – дільниця оперативного друку ХНАУ