

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»



ЛЕКЦІЙНІ ДЕМОНСТРАЦІЇ З ФІЗИКИ

Молекулярна фізика. Термодинаміка
для студентів інженерно-технічних спеціальностей
всіх форм навчання

2023

Лекційні демонстрації з фізики. Молекулярна фізика. Термодинаміка. Для студентів інженерно-технічних спеціальностей всіх форм навчання / Укл.: С.В. Лоскутов, А.А. Кубишкін, О.А. Зеленіна, С.В. Сейдаметов. – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2023. – 52 с.

Укладачі: С.В. Лоскутов, професор, д-р фіз.-матем. наук
А.А. Кубишкін,
О.А. Зеленіна,
С.В. Сейдаметов

Рецензент: А.В. Єршов, професор, д-р техн. наук

Відповідальний
за випуск: А.А. Кубишкін

Затверджено
на засіданні кафедри фізики
Протокол № 5 від 21.04.2023 р.

Рекомендовано до видання НМК
Електротехнічного факультету
Протокол № 9 від 25.05.2023 р.

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1. Молекулярна фізика.....	5
1.1. Броунівський рух.....	5
1.2.Змішування ацетону з водою.....	7
1.3.Статистичний розподіл. Дошка Гальтона.....	8
1.4.Внутрішнє тертя в газах.....	11
1.5.Тиск атмосфери.....	13
1.6.Температурна залежність в'язкості газу.....	14
1.7. Радіометр Крукса.....	16
1.8.Ріст кристалів гіпосульфїта в поляризованому світлі.....	23
2. Термодинаміка.....	25
2.1. Повітряне кресало.....	25
2.2. Дослід з туманом.....	25
2.3. Реальні гази. Дослід Авенаріуса.....	31
2.4. Властивості речовини при низьких температурах.....	35
2.5. Дифузія.....	36
2.5.1 Дифузія в газах.....	36
2.5.2 Природна дифузія в атмосфері.....	37
2.5.3 Дослід існування дифузії в газах.....	38
2.5.4 Дифузія в рідинах.....	38
2.5.5 Дифузія в твердих тілах.....	39
2.6. Друге начало термодинаміки.....	39
2.7. Принцип дії теплового двигуна.....	43
2.8. Дослід Дарлінга з аніліном.....	46
2.9. Теплове розширення.....	47
Список використаної літератури.....	52

ВСТУП

Молекулярна фізика – наука про молекулярну будову, властивості, тепловий рух речовин у різних агрегатних станах та їх взаємні переходи.

У термодинаміці розглядаються термодинамічні системи - макроскопічні об'єкти, що можуть обмінюватися енергією як один з одним, так і з зовнішнім середовищем. Для опису стану термодинамічної системи вводять фізичні величини, які називаються термодинамічними параметрами стану системи.

1 МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА

1.1 Броунівський рух

Це явище було відкрито в 1827 р. англійським ботаніком Робертом Броуном (R. Brown 1773-1858 р.) при випробуванні ахроматичних об'єктивів. Він спостерігав в мікроскоп рух квіткового пилку, зваженого у воді. Броун виявив, що всі найдрібніші частинки (розмір їх $\sim 10^{-6}$ м), завислі в рідині, знаходяться в безперервному русі, цей рух ніколи не припиняється (він виникає навіть у рідких включеннях кварцу, яким нараховується тисячі років). Броунівський рух рідини тим скоріший, чим менша в'язкість рідини. Його ледь вдається помітити в гліцерині, тоді як у газах він надзвичайно інтенсивний. Перрену (Жан Батист, 1870-1942 р.) вдалося спостерігати броунівський рух крапельок, які лежать на «чорних плямах» мильних бульбашок, тобто, на найбільш тонких ділянках мильної плівки (діаметр цих крапельок в тисячі разів більше товщини плівки). Для однієї і тієї ж рідини броунівський рух відбувається тим інтенсивніше, чим менші розміри частинок і чим вище температура рідини. Якщо б можна було виміряти миттєву швидкість броунівської частинки, то за класичною формулою

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{3}{2}kT$$

можна було б розрахувати постійну Больцмана, а за нею і число Авогадро. Спроби таких вимірювань робилися неодноразово, але незмінно приводили до суперечливих результатів. Це стало можливим лише після того, як у 1905 році Альберт Ейнштейн (1879-1955 р.) розробив математичну теорію броунівського руху. В теорії Ейнштейна миттєва швидкість броунівської частинки не згадується. Замість неї входить довжина прямолінійного відрізка, який з'єднує положення частинки в два різних моменти часу (величина, доступна вимірюванню). Формула Ейнштейна має вигляд:

$$\Delta\langle x^2 \rangle = \frac{kT}{3\pi\eta r} \Delta t$$

де $\langle x^2 \rangle$ – середній квадрат зміщення броунівської частинки за час t ; k – стала Больцмана; η – коефіцієнт внутрішнього тертя рідини; r – радіус броунівської частинки; Δt – проміжок часу між послідовними спостереженнями за частинкою.

Частинки, радіусом r , що рухається у в'язкому середовищі з коефіцієнтом внутрішнього тертя η . Формула Ейнштейна була експериментально підтверджена в численних дослідях, розпочатих у 1908 р. і проведених з усією можливою для тих років ретельністю.

Для спостереження броунівського руху в аудиторії використовують біологічний мікроскоп (із збільшенням ~ 600 раз) та відеокамеру, сполучену з телевізійним підсилювачем і моніторами (в аудиторії). Необхідний також водний розчин гумігуту.

На предметне скло мікроскопа наносять краплю водного розчину гумігуту і накривають її іншим склом. Наводять окуляр мікроскопа на різкість, домагаючись виразної картини. Підключають відеокамеру і розміщують її над окуляром мікроскопа.

На екранах моніторів студенти спостерігають рух частинок фарби, зважених у воді. Увага студентів має бути звернена на зигзагоподібний рух окремої частинки, маса якої набагато більше маси молекули води.

Шматочки фарби («броунівські» частинки) хаотично і зигзагоподібне рухаються під дією випадкових ударів молекул води. Сили ударів молекул, які діють на одну (виділену) частинку, ніколи не будуть скомпенсовані між собою. Умова компенсації сил означала б, що кілька частинок одночасно з різних сторін і з однаковими силами вдарили броунівську частинку. Якщо б це сталося, частинка залишилася б на місці. Той факт, що вона стихійно рухається, означає, що частинка отримує більший імпульс у певному напрямку.

Експеримент необхідно показувати студентам при вивченні основних положень молекулярно-кінетичної теорії ідеального газу.

Дослід 1. Модель броунівського руху.

Для спостереження за броунівським рухом використовують прилад під назвою "Прилад для демонстрування моделі броунівського руху", який являє собою металеву рамку з круглим отвором. Отвір

рамки закритий двома квадратними скляними пластинками. Між ними є зігнута в кільце пластинчаста пружина, яка може вільно коливатися, якщо ударяти молоточком по її кінцю, закріпленому на рамці. Всередині пружини між скляними пластинками є 10 маленьких сталевих кульок і невеликий гумовий корок. На рамці, збоку пружини, прилаштовано ударний механізм, який складається з молоточка і храпового колеса, закріпленого на осі з рукояткою. При обертанні рукоятки, храпове колесо чіпляється за дротяну пружину молоточка, який ударяє по кінцю пластинчастої пружини і приводить її в коливання. Ударяючись об пружину, кульки, що є всередині кільця пружини, приходять у швидкий хаотичний рух, ударяють об корок і переміщують його в різних напрямках. Кульки імітують молекули води, а гумовий корок – частинку фарби, що перебуває у воді в завислому стані.

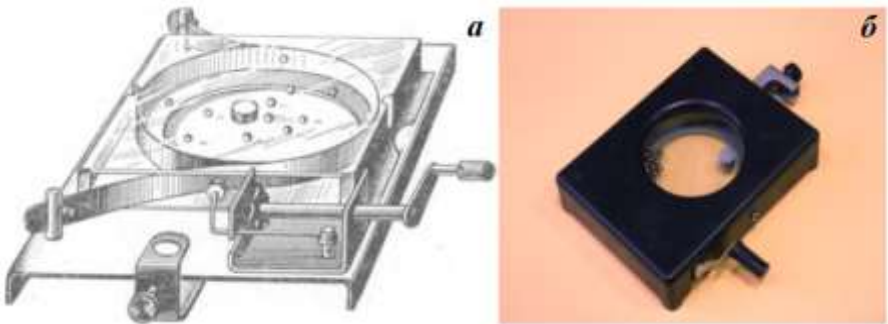


Рисунок 1.1 – Прилад для демонстрування моделі броунівського руху. Схема роботи та загальний вид .

1.2 Змішування ацетону з водою

Обладнання: довга (довжиною 1 м) скляна трубка, запаяна з одного кінця, підфарбована вода, ацетон, корок, два гумових кілечка, які туго натягнуті на трубку.

В трубку наливають до половини підфарбовану воду і фіксують її рівень гумовим кільцем. Потім обережно, по стінці трубки,

вливають ацетон. Його рівень також фіксують іншим гумовим кільцем. Трубку закривають корком і енергійно кілька разів перевертають.

Спостерігають і переконуються в тому, що після перемішування рідин, рівень суміші виявився нижче верхнього гумового кільця.

Отже, обсяг суміші стає менше суми обсягів змішаних рідин. Розрахунки і ретельні вимірювання дають такі результати: при змішуванні 100 см^3 води і 100 см^3 ацетону виходить $\sim 195 \text{ см}^3$ суміші. Цей факт говорить: по-перше, про різні компактності молекулярних систем (в суміші молекули розподіляються щільніше) і, по-друге, про наявність проміжків для будь-яких речовин. При змішуванні речовин має місце дифузія - проникнення молекул однієї речовини в проміжки між молекулами іншої речовини.

Дослід доцільно показати студентам при викладі моделі ідеального газу.

1.3 Статистичний розподіл. Дошка Гальтона

Дошка Гальтона виготовлена таким чином: це плоский (товщиною 10 - 15 мм) ящик (розмірами $\sim 10 \times 80 \text{ см}^2$), передня стінка якого закрита склом. У верхній стінці є отвір, в який вставлена лійка. задня стінка ящика розділена навпіл: у верхній половині, в шаховому порядку, набиті дрібні цвяхи, а нижня половина скриньки за допомогою металевих смужок розбита по вертикалі на вузькі клітинки, шириною до 1 см.

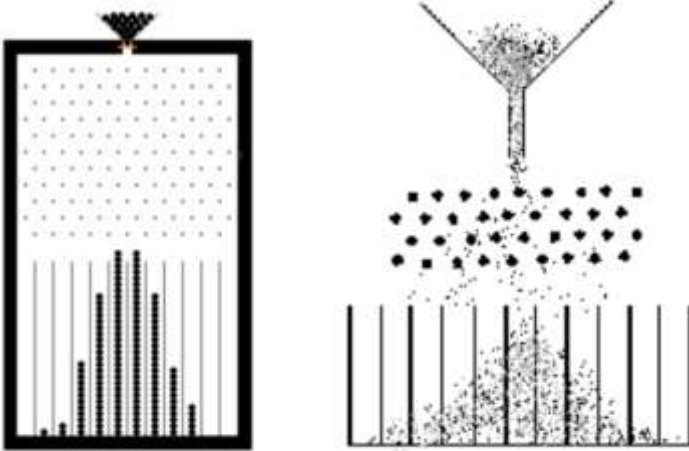
Для проведення досліду необхідно мати кілька великих частинок (горошин) і велику кількість дрібних частинок (пісок, пшоно).

В лійку закидають кілька горошин. Вони, при падінні, на своєму шляху зустрічають безліч зіткнень з цвяхами і в кінці руху впадуть в одну з вертикальних комірок.

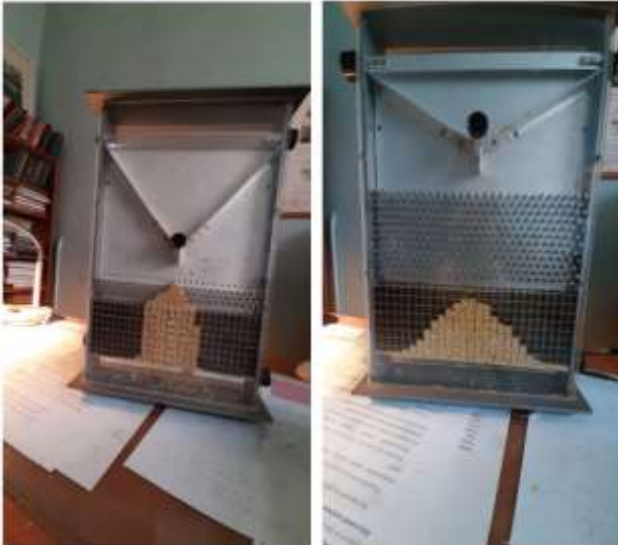
У лійку тонким струменем висипають сухе пшоно. Зерна пшоно заповнюють клітинки.

В досліді «а» студенти спостерігають за рухом окремої частинки і переконуються в тому, що неможливо передбачити номер комірки, в яку впаде горошина. Ця подія випадкова, непередбачувана. В досліді «б» спостерігають як відбувається заповнення клітинок дошки

Гальтона пшоном: швидше інших заповнюються клітинки, розташовані проти отвору з лійкою, повільніше – крайні клітинки.



a



б

Рисунок 1.2 – Дошка Гальтона.
Схема роботи та загальний вид

Ступенева крива (гістограма), для якої потрібно побудувати огинаючу криву (і це можна зробити за допомогою телевізійної та комп'ютерної техніки) залежить від кількості частинок в тій або іншій комірці.

По ходу досліду його результат пояснюють з точки зору ймовірності попадання частинки в задану клітинку. Огинаюча крива є функцією розподілу ймовірності. Ця симетрична крива, названа кривою Гауса, при дуже великій кількості частинок, асимптотичне наближається до кривої виду

$$y = y(x) = A \cdot e^{-\alpha x^2}$$

де A і α – позитивні постійні.

Постійна α – характеристика приладу, яка не залежить від кількості частинок. Постійна A – пропорційна числу частинок і зв'язана з α умовою нормування функції. Аргумент x (а точніше dx) в нашому дослід відіграє роль ширини клітинки. Формула $y = y(x)$ виражає, так званий, нормальний закон помилок Гауса.

Студенти, аналізуючи цей експеримент, повинні переконатися в тому, що поведінка кожної (окремої!) частинки в системі – це подія стихійна, а велика кількість стихійних подій призводить до статистичної закономірності.

Дослід доцільно показати студентам перед викладом теми «Розподіл молекул ідеального газу за швидкостями», коли вводяться основні поняття статистичних розподілів.

Модифіковані досліди з дошкою Гальтона дозволяють чітко окреслити умови, за яких розподіл розсіяних частинок відповідає нормальному розподілу або функції Максвелла, а також отримати тонку структуру розподілу в разі розсіювання частинок на регулярній ґратці штирків, що з певними припущеннями можна використати в лекційних демонстраціях, як аналог явищ дифракції електронів на ґратках кристалів та принципів дефектоскопії. На прикладі розсіювання частинок, при їх ударах з впорядкованою та хаотичною структурами, змодельований зв'язок категорій випадковості та закономірності в хаотичних системах та прояви латентного порядку в цілком хаотичних процесах. Продемонстровано вплив на еволюцію статистичних систем початкових умов, що суттєво поглиблює

розуміння статистичних закономірностей в задачах багатьох тіл і полегшує сприйняття студентами сутності статистичних законів.

1.4 Внутрішнє тертя в газах

Устаткування: електромотор з диском, що обертається, диск на нитяному підвісі, штатив універсальний, вакуумний насос, вакуумна камера. Загальний вид установки зображений на рис. 1.3.

Дослід 1. Порядок проведення дослідів. Демонстрацію внутрішнього тертя у повітрі показують з легким диском, який підвішений на нитках до штатива (рис. 1.3, а). Під диском установлюють електродвигун з таким же диском на відстані 1,5 – 2 см від першого. Диски розміщують в горизонтальній площині. Приводять нижній диск в обертання і спостерігають, як завдяки наявності сил внутрішнього тертя в шарах повітря, яке перебуває між дисками, верхній диск повертається, закручуючи нитку підвісу. Верхній диск повертається в тому ж напрямку, що і нижній, але з меншою швидкістю. Для зручності спостереження за поворотом диска на нього кріплять прапорець. Сили внутрішнього тертя пропорційні градієнту швидкості. Градієнт швидкості можна міняти, регулюючи частоту обертання електродвигуна автотрансформатором або змінюючи відстань між дисками. При обертанні диска рух передається молекулам від одного шару повітря до іншого. Молекули переміщуються як по вертикалі, із шару в шар, так і по горизонтальним шарам повітря. Рух молекул по вертикалі утворює тертя в газах.

Дослід 2. Дослід залежить від зовнішнього тиску. Якщо дослід проводити в вакуумній камері (під скляним ковпаком), розкрутити нижній диск, щоб обертальний рух передався верхньому диску.

Вмикаємо насос і поступово будемо відкачувати з-під ковпака повітря. Спостерігаємо, що обертальний рух верхнього диска сповільнюється. Верхній диск, з часом, зупиняється. Чому? В камері зменшується кількість повітря, а отже і кількість молекул. Взаємодія між молекулами зменшується і при певній кількості молекул, сили тертя не спроможні передати обертальний рух від одного шару повітря до іншого. Швидкість обертання верхнього диска, також

залежить від віддалі між дисками або від градієнта швидкості. Чим товщий шар повітря, тим більші сили тертя між дисками і повітрям.

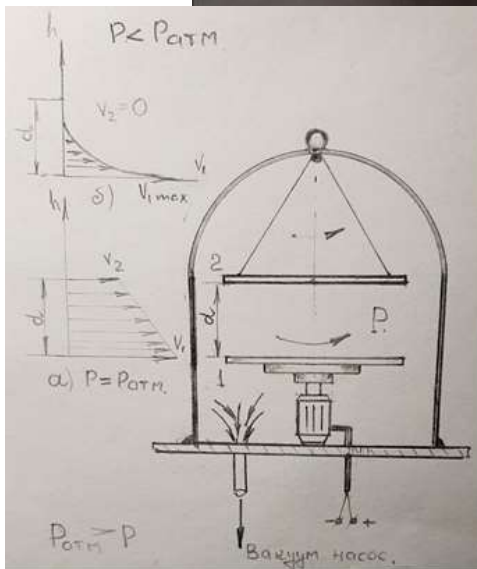
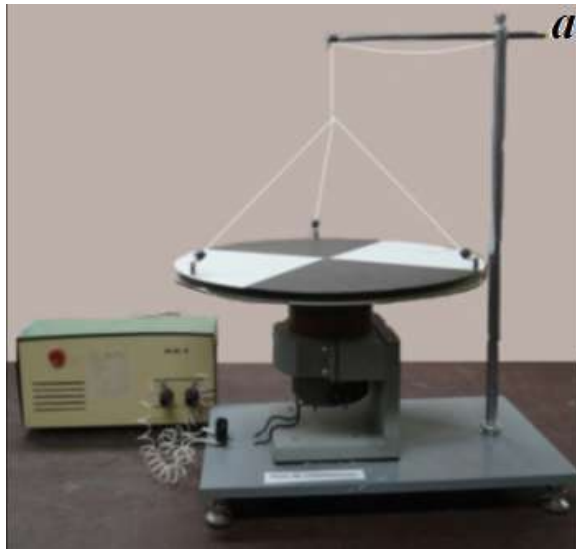


Рисунок 1.3 – Диск на нитяному підвісі (а) та в умовах пониженого тиску (б)

1.5 Тиск атмосфери

Склянку, не повністю заповнену водою, накривають аркушем паперу, притискають рукою і швидко перевертають вверх дном. Руку прибирають, але аркуш залишається на місці і вода не виливається. Знову притримуючи аркуш долонею, повертають склянку в початковий стан. Прикріплений папірець не відривається, навіть, коли на нього тисне вода в склянці. Пояснюється це тиском атмосфери, яка оточує перевернуту склянку. За законом Паскаля тиск передається в усі сторони однаково. Ця сила тиску притискає аркуш знизу, незважаючи на гідростатичний тиск стовпа рідини в склянці. Атмосферний тиск виникає за рахунок гравітаційного поля Землі. Поверхня Землі оточена молекулами газів. Нижній шар газів найбільш щільний. На нього тиснуть інші (верхні) шари газів. Цей стовп повітряних газів і утворює атмосферний тиск. Аналогом існування атмосферного тиску може бути довга циліндрична пружина, поставлена вертикально на стіл. Нижні витки пружини будуть стиснуті більше ніж верхні.

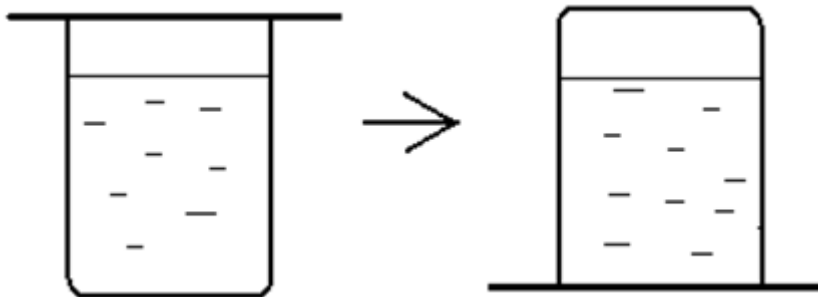


Рисунок 1.4 – Склянка з водою в нормальному стані та перевернута вверх дном

Людство живе на дні величезного повітряного океану. На поверхні Землі цей тиск становить 760 мм ртутного стовпа. При зануренні в воду на 10 метрів тиск буде утворюватися від атмосферного тиску і тиску від товщі води. Тиск води висотою в 10 метрів дорівнює атмосферному тиску (10 метрів вод. ст.= 760 мм рт. ст.). Нормальний атмосферний тиск дорівнює тиску стовпа ртуті

висотою 760 мм. Не важко здогадатися, що відбувається, коли з океанських глибин витягують рибу на поверхню води. Тиск води на рибу і тиск крові в рибі зрівноважені. Риба в нормальному стані. При піднятті на поверхню зовнішній тиск різко падає до $P_{атм}$. Внутрішній тиск не урівноважується. Судини всередині риби лопаються. Подібні явища відбуваються і з людьми – льотчиками та космонавтами. Льотчики, які летять на висоті 18 000 метрів, крім кисневої маски, одягають «висотний костюм». Він виготовлений з міцної тканини і з вшитими гумовими трубками та подушечками. При піднятті на певні висоти автоматично подається повітря в костюм. Трубки та подушечки надуваються повітрям і натягують тканину, утворюючи додатковий тиск. Пілот захищений. Недостача зовнішнього тиску зрівноважується. В космічних кораблях, завдяки герметизації, тиск дорівнює атмосферному. При виході з корабля космонавти одягають скафандри. Відомий випадок, коли космонавт через люк вийшов в відкритий космос, а при поверненні назад виникли певні труднощі, – космонавт не міг «пролізти» через люк. Скафандр «роздуло», – тиск в космосі значно менший атмосферного. Завдяки зусиллям команди космонавт повернувся в корабель.

1.6 Температурна залежність в'язкості газу

Пристрій уявляє собою розгалужену Т-подібну трубку, на кінцях якої вставлені форсунки. Від балона подається побутовий газ пропан-бутан і запалюються обидві форсунки. При нагріванні від спиртівки одного із колін, висота полум'я у цьому коліні помітно зменшується, порівняно з протилежним. Нагрівання побутового газу можна проводити за допомогою електроспіралі, яка намотана на трубку. Використання електрики для нагрівання більш раціональне, тому що можна регулювати як температуру нагріву, так і час нагріву. В місті нагріву в трубку вставлений керамічний капіляр. Такий же капіляр має і інший край трубки. зменшення висоти полум'я пояснюється зростанням в'язкості газу при його нагріванні у відповідності з теоретичною формулою

$$\eta = \frac{1}{3} \rho v_{\text{сер.ар.}} \lambda$$

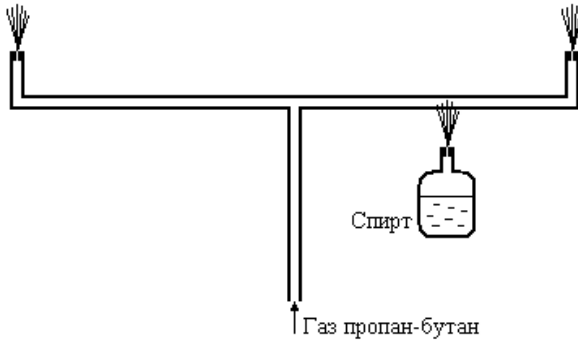
***a******б***

Рисунок 1.5 – Демонстраційний пристрій температурної залежності в'язкості газу.

При нагріванні трубки з газом висота полум'я в трубці зменшується (лівий патрубок). В'язкість газу при нагріванні збільшилась

З формули видно, що від температури залежить середня арифметична швидкість молекул

$$v_{\text{сер.ар.}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}$$

Вона зростає. Крім цього зростає і довжина вільного пробігу молекули, згідно з формулою Сьозерленда

$$\lambda = \frac{\lambda_{\infty}}{1 + \frac{C}{T}}$$

1.7 Радіометр Крукса

«Класичний» радіометричний ефект передбачив і експериментально обґрунтував англійський фізик і хімік Вільям Крукс (1832-1919 році). Найпростіший радіометр Крукса влаштований так: на тонку пластинчасту пружинку (П), закріплену на дні скляної колби, прикріплений слюдяний листочок (С), одна сторона якого покрита чорної фарбою. З колби викачано повітря. Якщо листочок освітити, то виникне різниця температур між дзеркальною та зачерненою поверхнями листочка. Молекули повітря, що залишилися в колбі, з більшою силою відштовхуються від зачерненої поверхні, ніж від дзеркальної, внаслідок чого листочок на пружинці відхилиться вбік світлої поверхні. Для розріджених газів існує співвідношення:

$$\frac{P_1}{P_2} = \sqrt{\frac{T_1}{T_2}}$$

Чим більша різниця температур, тим більший перепад тиску по різні сторони пластинки і, отже, на більший кут відхилиться пелюсток (на цій залежності заснована дія радіометричного манометра).





Рисунок 1.6 – Теплоприймач



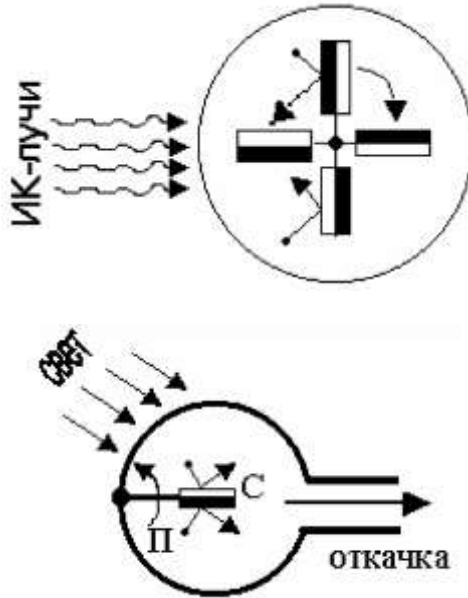


Рисунок 1.7 – Радиометр Крукса

Для пояснення радіометричного ефекту використовується демонстраційний радіометр Крукса, джерело світла (проекційний ліхтар) з ІЧ-фільтром, підігріта вода, ефір, плоска кювета. Більш вдосконалений радіометр Крукса влаштований так: в центрі колби з відкаченим повітрям, заповненою малою кількістю гелію, на опорній голці встановлена легка крильчатка, «крильця» якої (їх чотири замість однієї пластини) з одного боку вони зачорнені, а з іншого дзеркальні.

Світлом від ліхтаря, яке проходить через ІЧ (інфрачервоний) фільтр, освітлюємо крильчатку радіометра;

а) ставимо в радіометр кювету і поливаємо колбу радіометра теплою водою;

б) поливаємо колбу ефіром, завдяки чому колба охолоджується.

У досліді а) крильчатка радіометра починає швидко обертатися у бік світлої сторони її «крилець» (звичайне світло від ліхтаря (без ІЧ-фільтра) обертання крильчатки не викликає).

Вертикальний конвекційний потік «теплого» газу, створюваний нагрітою водою, викликає обертання крильчатки в один бік, і б) потік

«холодного» газу (при охолодженні колби ефіром) обертає крильчатку в інший бік.

Обертання крильчатки при освітленні її ІЧ-променями відбувається завдяки радіометричному ефекту. Атоми гелію, вдаряючись об більш нагріті зачернені боки «крилець», передають їм більший імпульс, ніж при ударах об дзеркальний бік. Крильчатка починає обертатися тільки в певному напрямку, показаному на малюнку. Таким чином, радіометричний ефект полягає в тому, що нерівномірно нагріті тіла, які знаходяться в розріджених газах, самостійно приходять в рух у напрямку від більш нагрітого боку тіла до менш нагрітого.

Різний напрямок обертання крильчатки в дослідах «а» і «б» пояснюється тим, що «крильця» радіометра нахилені під малим кутом до вертикалі і при наявності вертикального конвекційного потоку крильчатка працює як звичайний повітряний гвинт. Зміна напрямку потоку приводить до зміни напрямку обертання крильчатки.

Радіометр Крукса потрібно демонструвати при поясненні основних положень МКТ, а також у квантовій оптиці при доказі закону Кірхгофа для теплового випромінювання і наслідків з цього закону.

Радіометр був створений в 1873 р. британським вченим сером Вільямом Круксом. Спочатку В. Крукс був переконаний, що обертання ротора викликане тиском світла на чорні сторони лопатей. Поясненням обертання ротора займалися Д. Максвелл і А. Ейнштейн. Зміна напрямку обертання крильчатки радіометра Крукса під впливом катодних променів розглядається в роботі [2]. Чи можливе обертання вертушки радіометра тиском світла? Тиск світла мусить викликати силу, направлену вбік від блискучих поверхонь лопаток, тобто, ротор повинен обертатися в напрямі зворотному від попереднього. А. Шустер, співробітник О. Рейнольдса, провів експеримент, підвісивши радіометр на тонкій нитці. Як тільки балон радіометра нагрівали, вертушка починала обертатися. Але і колба радіометра теж починала обертатися - тільки в інший бік.

Незабаром стало очевидним, що ефект обертання лопаток радіометра пов'язаний з особливостями перетворення теплової енергії в механічну і обумовлений взаємодією молекул газу з лопатками вертушки, зачорненої і світлої сторін лопаток. Молекули газу, ударяючи в поверхню нагрітої чорної сторони лопаток, атоми якої

енергійніше коливаються, відскакують від неї з більшою швидкістю, ніж від поверхні дзеркальної сторони. Ця різниця в швидкостях відбитої і падаючої молекул повинна викликати більший тиск на чорну сторону і відповідне обертання.

Таким чином, пояснення радіометричного ефекту має молекулярно-кінетичне походження: відбувається передача молекулам газу при віддзеркаленні їх від більш нагрітої сторони тіла більшого імпульсу, ніж молекулам, що відбиваються від менш нагрітої сторони. Викликана молекулярно-кінетичною природою сила пропорційна тиску. Вона відіграє помітну роль в слабо-розріджених газах, в яких тиск відносно не великий. У сильно-розріджених газах в умовах малої ролі теплового ковзання молекулярно-кінетична сторона радіометричного ефекту також відіграє основну роль. При великому тиску середовище починає поводитися як континуум, в якому тиск в усіх точках посудини однаковий. Це викликано тим, що пристінковий шар малий, оскільки молекули проходять надзвичайно малу відстань від тіла до зіткнення з наступною молекулою.

Ударяючись об поверхню, молекула взаємодіє лише з невеликим числом атомів або молекул, які поблизу поверхні, обмінюється з ними імпульсом і відбивається. При цій взаємодії кут віддзеркалення не рівний куту падіння, і залежить від конкретних умов взаємодії з молекулами поверхні. Теплові коливання атомів поверхні твердого тіла мають певний напрямок коливань від поверхні. В середньому для молекул, що приходять з даного напрямку, кут віддзеркалення менше кута падіння.

Розсіювання газу атомарно-чистою поверхнею металу можна віднести до теплового режиму, в якому теплові коливання атомів поверхні є домінуючим чинником, що визначає характер взаємодії атомів газу з поверхнею. Цей режим розсіювання характеризується плоскою ефективною поверхнею взаємодії. Принаймні, такою її сприймає падаючий на поверхню атом. При цьому взаємодія в системі газ - тверде тіло відбувається на досить великих відстанях від поверхні, при яких практично відсутнє проникнення атомів газу в поверхню.

У випадку шорсткої поверхні, якою, зокрема, є зачорнена поверхня лопастей, атоми газу в більшій кількості адсорбуються на ній. В результаті малої насиченості силового поля окремих виступів і піків поверхні, ці елементи мають можливість утримувати налітаючи

молекули газу. При збільшенні тиску газу число адсорбованих молекул збільшується. Час перебування молекул в адсорбованому стані залежить від температури і при не високих температурах може бути значним. Через певний час, в результаті флуктуації кінетичної енергії, молекули відриваються від поверхні адсорбента і переходять в газову фазу, віддаючи відповідний імпульс поверхні. Замість цих молекул, активні центри можуть адсорбувати нові молекули, які в свою чергу десорбуються. При зміні тиску газу число адсорбованих молекул на поверхні динамічно змінюється. Це явище можна спостерігати на радіометрі Крукса.

Якщо радіометр Крукса обдувати теплим повітрям, так щоб його стінки нагрілися до $55 \div 60$ °С, то спостерігається обертання вертушки у напрямі блискучих поверхонь, протилежно радіометричному ефекту. Це спостереження пояснюється тим, що гаряче повітря нагріває скляну колбу радіометра і відповідно газ. Тиск газу збільшується. Молекули газу, набуваючи великої кінетичної енергії, досягають чорної і блискучої поверхонь вертушки і передають їм відповідний імпульс. Причому, у разі віддзеркалення цих молекул від блискучих поверхонь, передається більший імпульс в порівнянні з молекулами відбитими від зачорнених поверхонь, тому що значна частина молекул при підвищенні тиску газу додатково адсорбується на зачорненій поверхні. Через деякий час колба прогривається, тиск газу перестає змінюватися і обертання припиняється. При цьому число падаючих і відбитих молекул від зачорненої і дзеркальної поверхонь врівноважується.

У лекційному експерименті, спочатку вмикають лампу розжарювання і спостерігають звичайний радіометричний ефект. Потім світло вимикають і на радіометр Крукса направляють потік теплого повітря. Тиск газу в колбі поступово збільшується і лопасті починають рухатися протилежно радіометричному обертанню. Після прогрівання колби і встановлення незмінного тиску обертання лопастей вертушки припиняється. Далі, після відключення потоку теплого повітря, колбу охолоджують холодною водою. Температура газу і, відповідно, тиск зменшуються. Вертушка без додаткового освітлення починає обертатися в напрямі радіаційного ефекту, що пояснюється десорбцією молекул газу з зачорнених поверхонь.

1.8 Ріст кристалів гіпосульфїта в поляризованому світлі

Устаткування: проекційний ліхтар, гіпосульфїт, два поляроїда, дві скляні пластини.



Рисунок 1.8 – Фото устаткування

Порядок проведення досліду. Багато речовин, будучи розплавлені, легко переохолоджуються. В пробірку насипають кристали гіпосульфїта. Потім кристали розплавляють, нагріваючи пробірку в гарячій воді (час нагрівання й плавлення напротязі 30 хв). Плавити гіпосульфїт необхідно обережно, щоб не дати рідині закипіти, інакше речовина розкладеться. Температура плавлення гіпосульфїта 48,2 °С. Краплю, отриманого в такий спосіб препарату, в гарячому виді поміщають між двома скляними пластинами, які сильно притискають краплю. Проектують на екран ці пластинки в поляризованому світлі. При схрещених поляризаторі і аналізаторі рідина виглядає темною. Торкаються кристаликом гіпосульфїта краю скла, і із цього місця починають рости пофарбовані кристали гіпосульфїта. Скло перед дослідом повинно бути вимите з милом і протерте спиртом.



Рисунок 1.9 – Кристалічна структура гипосульфіта

2 ТЕРМОДИНАМІКА

2.1 Повітряне кресало

У товстостінний прозорий циліндр з поршнем поміщають легкозаймисту речовину (піроксилін, порох, ефір). При вийнятому поршневі на дно циліндра кладуть невеликий шматочок піроксиліну, закривають циліндр поршнем і різко вдаряють по ньому долонею, всуваючи поршень. На дні циліндра через прозорі стінки спостерігають яскравий спалах.

При швидкому стисненні (близькому до адіабатичного) повітря під поршнем у циліндрі нагрівається настільки, що речовина запалюється. Це відбувається у відповідності з рівнянням Пуассона. Процес стиснення близький до адіабатичного, оскільки він протікає миттєво і за цей дуже малий проміжок часу газ не встигає обмінятися енергією з навколишнім середовищем. Отже, газ нагрівається.

Проведені досліди обов'язково треба показати студентам після виведення рівняння Пуассона і графіків для обговорення адіабатичного розширення і стиснення газу.

2.2 Дослід з туманом

Цей дослід демонструє адіабатичне розширення газу. Відомо, що таке розширення газу супроводжується його охолодженням. Це видно з рівняння Пуассона для двох станів ідеального газу - різке збільшення обсягу газу повинно привести до миттєвого зменшення його температури, що видно з формули:

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{\gamma-1}$$

Обладнання та методика виконання досліду: скляний балон має два отвори – верхній, щільно закритий гумовим корком, та нижній, через який пропускають невелику кількість води. Насосом повітря накачують у балон до тих пір, поки гумова пробка не вилетить з отвору. Це супроводжується сильним звуком.

Студенти спостерігають миттєве утворення туману всередині балона.

Оскільки на дні щільно закритої колби є невелика кількість води, то водяний пар в колбі знаходиться в стані насичення. В момент вильоту пробки пар різко розширюється. Це розширення можна вважати адіабатичним, оскільки воно протікає миттєво, теплообмін газу з навколишнім середовищем не встигає відбутися і газ охолоджується. Якщо охолодження газу відбудеться до точки роси (або нижче), а для водяної пари це $\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, то пари в колбі конденсуються і в ній утворюється туман. Його ми і спостерігаємо в ході досліду. Якщо знову закрити колбу пробкою і накачати в неї повітря, то туман швидко зникає внаслідок нагрівання пари.

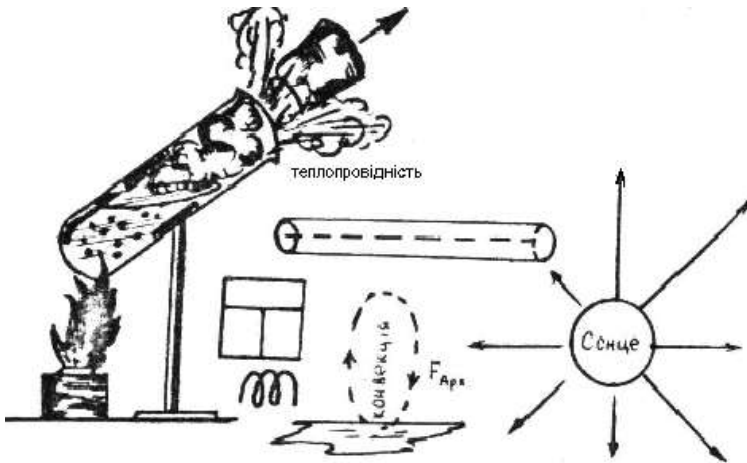


Рисунок 2.1 – Різні випадки пароутворення в природі

Другим видом пароутворення є кипіння. Розглянемо послідовність фізичних явищ, які виникають під час кипіння води. Для прикладу взята вода, як рідина, яка супроводжує наше життя. Щоб вода закипіла, необхідно мати в ній центри кипіння. Такими центрами може бути розчинне в воді повітря, яке знаходиться в бульбашках. В цих бульбашках є насичена пара, яка створює внутрішній тиск. Цей тиск залежить від температури. Центрами кипіння можуть бути також різні механічні приміси: частинки піску, рослин, а також, електричні

заряди. Німецький вчений Ф. Кольрауш досліджував вплив примісів на кипіння води. Він 21 раз перекип'ячував воду, перетворюючи її в пар. Після кожного кип'ячіння вода «неохоче» закипала. Здавалося, що всі газові бульбашки, які були в воді, виходили з води. Центрів кипіння не було, а вода закипала. Ф. Кольрауш установив, що центрами кипіння були електричні заряди, які виникали від освітлення води сонцем. Молекула води, під дією сонячних променів, розпадалась на заряди. Ці заряди служили центрами, до яких приєднувались вільні молекули води. “Прилипання” молекул газу до молекул поверхневого шару твердого тіла називається адсорбцією.

Кипінням називається процес пароутворення, який відбувається не тільки з вільної поверхні рідини, а і всередині рідини. В рідині є завжди розчинений газ, молекули якого прилипають до стінок посудини, утворюючи маленькі бульбашки газу. В цих бульбашках знаходиться розчинений газ і насичена пара, які створюють внутрішній тиск, що залежить від температури.

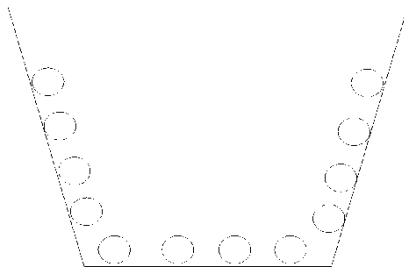


Рисунок 2.2 – Вода до нагрівання

На стінках посуду знаходяться адсорбовані молекули води.

Дослід поділимо на етапи:

1 етап – рідина не повністю прогріта, верхні шари холодніші від нижніх. На стінках посуду з’являються перші бульбашки, в яких є повітря та насичена пара. На бульбашку діють зовнішній тиск та внутрішній. Зовнішній тиск складається з гідростатичного тиску та атмосферного. На бульбашку діє тиск від плівки бульбашки, або від кривизни поверхні, яка оточує бульбашку. Цей тиск називають Лапласівським. Внутрішній тиск створюється насиченою парою P .

Отже, в стані спокою:

$P_{\text{вн}} = P_{\text{зовн}}$ – бульбашка не міняє розмірів,

$$P_{\text{зовн}} = P_{\text{атмосф.}} + P_{\text{гідрост.}} + P_{\text{лаплас.}}$$

$$P_{\text{н.п.}} = P_{\text{атм.}} + P_{\text{гідрост.}} + P_{\text{лаплас.}}$$

Якщо воду нагрівати до більш високої температури, то в рідині з'являється багато вільних молекул. Рухаючись хаотично, вони потрапляють до бульбашок, збільшується маса та розміри бульбашки. На бульбашку діють сила тяжіння та Архімедова сила. В стані спокою

$$F_a = F_{\text{тяж}}$$

Зі збільшенням числа молекул в бульбашці зростає сила Архімеда, тому що зростає об'єм. Бульбашка відривається від центра кипіння і піднімається вгору, попадаючи в менш нагріті шари води. Насичена пара в бульбашці конденсується, її тиск зменшується. Зменшуються і розміри бульбашки, а Лапласовий тиск, що діє на бульбашку, збільшується. Бульбашка лопається і віддає насичену пару воді. Створюється характерний шум, який виникає перед кипінням води.



Рисунок 2.3 – Вода прогрілась

Бульбашки з газом та парою лопаються, не доходячи до поверхні.

2 етап – рідина прогрілась.

В процесі підйому бульбашки внутрішній тиск не міняється, а зовнішній тиск зменшується, так як зменшується гідростатичний і Лапласівський тиски, і тому в момент кипіння рідини бульбашки досягають поверхні, лопаються і віддають пару в атмосферу. Вода починає кипіти.

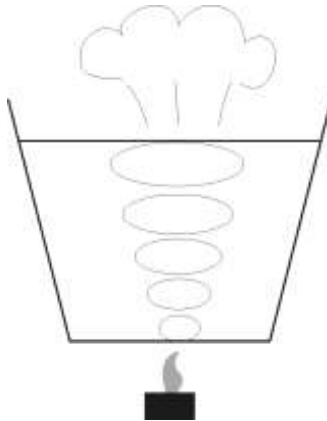


Рисунок 2.4 – Кипіння води. Виділення пари з всього об'єму води

Бульбашки з насиченою парою відриваються від центрів кипіння і піднімаються до межі розподілу вода – повітря. Бульбашки лопаються і віддають насичену пару повітря. Вода кипить.

$$P_{н.п.} \approx P_{ат.}$$

В момент кипіння тиск насиченої пари дорівнює атмосферному тиску, а тиск насиченої пари залежить від температури. Таким чином, температура кипіння рідини прямо пропорційно залежить від зовнішнього тиску, чим він більший, тим більша температура при якій відбувається кипіння води. Температура при якій кипить рідина називається температурою кипіння.

Температура кипіння води при нормальному атмосферному тиску називається точкою кипіння. Для води вона становить 100 °С.

Але вода може кипіти і при 150°C , і при вищій температурі. Це залежить від зовнішнього тиску. Підвищений тиск і підвищена температура кипіння створюються в автоклавах. Вода, температура якої більше 100°C , називається перегрітою. Перегріті рідини використовуються в ядерних дослідженнях для спостереження треків (слідів руху частинок)

Температура кипіння води найбільша в шахтах, а найменша в горах, тому що, в шахтах тиск більший за нормального атмосферного, а в горах – менший за нормального атмосферного. Але кава не завариться. При кипінні, за пониженого тиску, температура рідини знижується, так як вона кипить за рахунок власної внутрішньої енергії. В процесі нагрівання зростає швидкість руху молекул, збільшується відстань між молекулами і речовина розширюється.

Випаровування.

Це процес пароутворення, що йде з поверхні рідини. При випаровуванні зменшується температура рідини (з рідини виходять молекули з більшою енергією), температура пари над рідиною збільшується. Над водоймами, при відсутності вітру, існує рівновага між молекулами, які вийшли з рідини і які конденсувались.

Головною характеристикою випаровування є швидкість пароутворення. Чим більша поверхня рідини, тим швидше йде процес випаровування.

Дослід 1. Однакові кількості води наливаємо в пляшку з вузьким горлом і в блюдце (чашку Петрі). Фіксуємо початковий рівень. Через певний час спостерігаємо, що рівень води в пляшці майже не змінився, а в блюдці значно зменшився. Висновок: чим більша вільна поверхня рідини, тим інтенсивніше йде випаровування.

На швидкість випаровування впливає температура рідини.

Дослід 2. Для експерименту потрібні: дві посудини та два термометри. Однакову кількість води, але з різними температурами, наливаємо в однакові посудини. Спостерігаємо, що вода з більшою температурою випаровується швидше. На швидкість випаровування також впливає величина тиску над рідиною.

Дослід 3. В два блюдця наливаємо однакову невелику кількість води. Блюдця ставимо окремо одне від одного. На одне з них направляємо теплий потік повітря, що йде від фену. Спостерігаємо, що кількість води, яка обдувалася феном, помітно зменшилась.

Висновок: швидкість пароутворення залежить від зовнішнього тиску, чим менше тиск над рідиною, тим швидше йде пароутворення.

В вітряну погоду білизна висихає значно швидше, ніж в суху, сонячну. Молекули водяної пари у вітряну погоду зносяться потоками повітря, а в суху, безвітряну – над білизною утворюються шари насиченої пари, які не сприяють випаровуванню. Випаровування може проходити не тільки з рідин, а й з твердих поверхонь. Цей процес для твердих тіл називається сублімацією, або возгонкою. Сублімація відбувається в нафталіні, в «сухому льоді» та в інших речовинах.

2.3 Реальні гази. Дослід Авенаріуса

Відомо, що стан реального газу описується рівнянням Ван-дер-Ваальса, яке записано для одного моля газу.

$$\left(p + \frac{a}{V^2}\right) \cdot (V - b) = RT$$

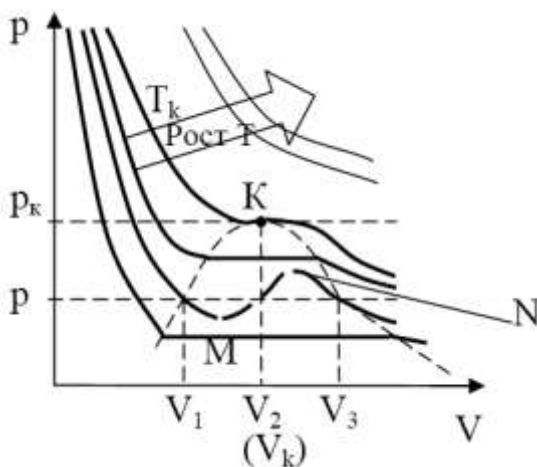


Рисунок 2.5 – Ізотерми реального газу

Поправки a і b , введені до параметрів ідеального газу, враховують сили взаємодії між молекулами (поправка « a » враховує сили тяжіння, а « b » – сили відштовхування). Сімейство ізотерм,

побудованих за рівнянням Ван-дер-Ваальса, зображене на діаграмі p - V для вуглекислого газу (CO_2). Видно, що ізотерми реального газу не монотонні, а мають розриви (ділянка MN на одній з ізотерм), які з підвищенням температури зменшуються. Для пояснення характеру рівняння ізотерм Ван-дер-Ваальса приводять до виду:

$$pV^3 - (RT + pb)V^2 + aV - ab = 0,$$

з якого видно, що рівняння є кубічним щодо обсягу (три кореня V_1 , V_2 і V_3 для тиску p показані на діаграмі для тієї ж ізотерми). Поправки a і b , постійні для кожного газу, визначаються дослідним шляхом через параметри кількох відомих станів газу.

Особливий інтерес представляє ізотерма, що проходить через точку K , яка позначає критичний стан газу. Видно, що стан реалізується при строго визначених параметрах p_K , V_K і T_K , які визначаються так: в критичній точці всі три кореня збігаються, рівняння Ван-дер-Ваальса буде мати вигляд $p(V - V_K)^3 = 0$, з якого випливає, що

$$V_K = 3b; \quad p_K = \frac{a}{27b^2}; \quad T_K = \frac{8a}{27Rb}.$$

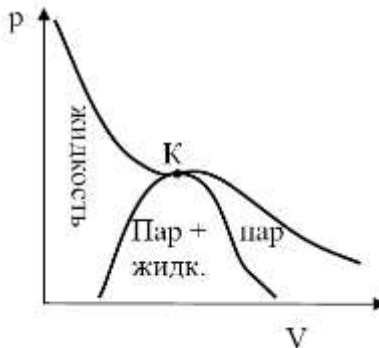


Рисунок 2.6 – Ізотерма критичного стану

Критична ізотерма і обвідна горизонтальних ділянок ізотерм ділять всю діаграму на чотири області, що відповідають різним агрегатним станам даної речовини. Видно, що критичний стан речовини - метастабільний стан, при якому зникає всяка відмінність між рідиною та її насиченою парою. При досягненні цього стану щільності рідини і її насиченої пари стає однаковими, зникають сили поверхневого натягу (зникає меніск), теплота пароутворення дорівнює нулю. При температурах, вище критичних, речовина може існувати тільки в газоподібному стані і ніяким ізотермічним стисненням її неможливо перевести в рідкий стан.

Критичний стан конкретної речовини (у нашому випадку – ефір) можна продемонструвати наступним чином. Невелика товстостінна скляна ампула заповнена ефіром і запаяна. Ампула підвішена в металевому кожусі, у якого задня й передня стінки скляні. Знизу кожух нагрівають спиртівкою. Все це встановлено на оптичній лаві, що дозволяє бачити ампулу на просвіт у збільшеному вигляді. Аудиторія повинна бути затемненою. Обсяг запаяної ампули підібраний близьким до критичного, а критичний тиск (для ефіру він 35 атм!) виходить при досягненні критичної температури (для парів ефіру це 194 °С). Таким способом досягають потрібну реперну точку, яка відповідає критичному стану рідини.

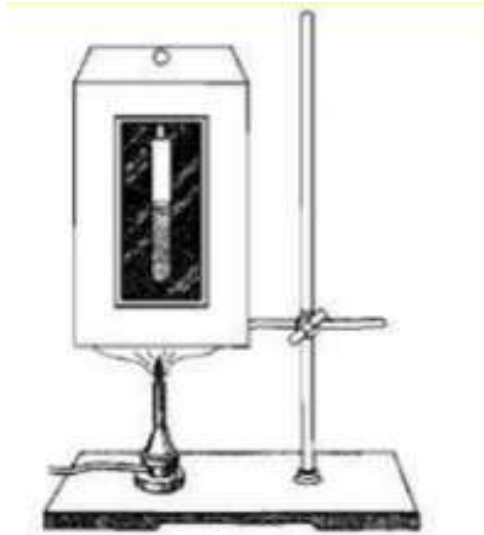


Рисунок 2.7 – Критичний стан ефіру. Дослід Авенаріуса

В процесі досліду на екрані студенти спостерігають зміну фізичних властивостей рідкого і пароподібного ефіру при його нагріванні і охолодженні в умовах, близьких до критичних. При кімнатній температурі на екрані видно різку межу між рідиною та її парою (увігнутий меніск). За великої різниці в їх показниках заломлення, нижня частина ампули виглядає більш темною, з яскравою світлою смугою в центрі. Верхня частина ампули, зайнята парами ефіру, буде абсолютно прозорою. При нагріванні ампули, щільність рідкої фази зменшується, а пароподібної – зростає. Зменшується поверхневий натяг рідини, змінюється кривизна меніска. Зменшується і показник заломлення рідкої фази, внаслідок чого яскрава вузька смуга рідини розширюється і, врешті-решт, нижня частина ампули стає настільки ж прозорою, що і верхня. Поблизу критичної температури меніск зникає зовсім і в ампулі, замість двох фаз, виникає однорідна речовина. Це і є критичний стан.

При охолодженні ампули в ній з'являються довільно розташовані області з різною щільністю газу. Ці флуктуації проявляються на екрані. У них при зниженні температури виникають

центри конденсації пари. Поступово вся ампула заповнюється рідкою фазою у вигляді дрібних крапельок (туману).

Простір в ампулі різко темніє (опалесценція) через розсіювання світла на крапельках рідини. Потім рідина починає збиратися в нижній частині ампули, з'являється межа розділу між рідкою і пароподібної фазами, відновлюється меніск. Система приходиться в первісний стан.

Дослід вперше був поставлений фізиком-експериментатором Михайлом Петровичем Авенаріусом (1835-1895 р.), професором Київського університету, член-кореспондентом Петербурзької АН, і носить його ім'я.

2.4 Властивості речовини при низьких температурах

Для виконання дослідів необхідні: посудина Дьюара з рідким азотом, пробірки із ртуттю, шматок мідного дроту, молоток, сукно, шматок гумового шлангу, свинцевий дзвіночок, шматок парафіну, яєчна шкарлупа, кварцева лампа (джерело ультрафіолетових променів). За допомогою рідкого азоту заморожують пробірку з ртуттю, попередньо вставивши шматок мідного дроту; коли ртуть застигне, беруть однією рукою за дріт, а іншою (молотком) розбивають пробірку, обернувши її сукном. Після цього застиглу ртуть розковують молотком на ковадлі. У застиглому стані поміщають ртуть в іншу скляну (закриту) посудину і через якийсь час показують, що після відтавання ртуть знову повертається в рідкий стан. У рідкий азот одним кінцем поміщають гумову трубку. Коли гума застигне, її молотком розбивають на шматки. У рідкому азоті охолоджують свинцевий дзвіночок, попередньо переконавши аудиторію, що у звичайних умовах твердість свинцю дуже мала й дзвіночок не дзвенить. Після заморожування дзвіночок починає мелодійно дзвеніти. Тепер у рідкий азот поміщають шматок парафіну у замороженому стані, освітлюють його ультрафіолетовим світлом від кварцової лампи. У затемненій аудиторії спостерігають яскраве свічення парафіну (люмінесценція). Те ж саме відбувається із замороженою яєчною шкарлупою. Беруть квітку (тюльпану, піонію, розу та іншу) і на декілька секунд занурюють в рідкий азот. Виймають

квітку, тримаючи за стебло. Легким ударом олівця або пальця торкаються квітки. Вона, мов скляна, розсипається на частинки.

2.5 Дифузія

Це природне явище існувало до створення людства та всього живого. Без дифузії неможливе життя. Існують різні визначення цього явища:

Дифузія – це проникнення молекул одного виду речовини в міжмолекулярній простір іншої речовини.

Дифузія – це процес вирівнювання концентрації молекул в двох або більше речовинах при їх змішуванні.

При дифузії молекули речовини переходять з тих частин речовини, де їх більше, в ту частину, де їх менше, в напрямку зменшення концентрації.

Дифузія проходить в газах, рідинах та в твердих тілах.

2.5.1 Дифузія в газах

Для спостереження за явищем дифузії використаємо товстостінний металевий циліндр, який розділений перегородкою на дві частини. В перегородці є отвір, який закривається клапаном. Регулювання руху клапана проходить завдяки електромагніту.

Нижня частина циліндра заповнена киснем, а верхня – воднем. В бокових стінках вставлені дві свічі для створення іскри. На початку досліду електрична іскра не викликає загорання газів, тому що кисень та водень відділені між собою.

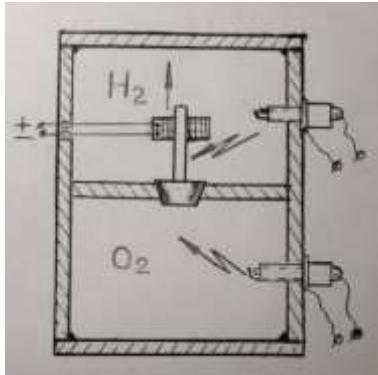


Рисунок 2.8 – Пристрій для демонстрування дифузії газів. При відкритому клапані гази змішуються, утворюючи гримучу суміш

Відкриваємо електромагнітом клапан. Гази вільно переміщуються по всьому об'єму циліндра. За допомогою свічок робимо електророзряд. Виникає розряд, чути вибух. В циліндрі при перемішуванні газів виник гримучий газ. Цікаво, при дифузії більш важкий газ кисень піднявся вгору а водень, який в 16 разів легше за кисень, опустився вниз. Гази рухались проти сил гравітації. Рух газів припинився, коли концентрація їх стала однаковою по всьому об'єму.

Зауваження. Цей експеримент бажано робити в закритій камері, щоб не було руйнування циліндра. Бажано використовувати малі об'єми газів з невеликим тиском.

Пояснення до експерименту. Молекули газів рухаються в циліндрі хаотично, попадають в проміжки між сусідніми молекулами, змішуються. Поступово виникає суміш газів з однаковою концентрацією двох сортів молекул. Утворилась гримуча суміш з водню та кисню, молекул газів різних розмірів та мас.

2.5.2 Природна дифузія в атмосфері

Відомо, що нижні шари атмосфери складаються з суміші азоту, кисню, вуглекислого газу, парів води та ін. газів. Цією сумішшю газів дихає все живе на Землі. Якщо дифузія могла б зникнути, хоч на мить, виникла б катастрофа. Під дією гравітаційного поля Землі, атмосфера могла розділитися на шари газів.

У самому нижньому шарі був би вуглекислий газ, самий важкий газ. Поверх знаходився шар кисню. Зверху кисню знаходився азот, а потім інші гази. Чи можливе було б дихання людини?

2.5.3 Дослід існування дифузії в газах

Для досліду необхідна посудина у вигляді каструлі, відра або скляного ковпака, невелика кількість пахучої речовини (одеколону, бензину або іншої речовини), дитяча надувна кулька.

Надуваємо гумову кульку до розміру 10-15 см в діаметрі. В кульці мусить бути тільки повітря. На шматочок вати або тканини капаємо одеколоном (можна бензином, або іншою рідиною, яка швидко випаровується і має запах). Ставимо посудину догори дном, а під неї вносимо гумову кульку та тканину з запахом одеколону. Чекаємо хвилин 20-30. Забираємо з під посудини надувну кульку. Відходимо від посудини на певну віддаль, щоб не відчувалося запаху рідини. Випускаємо з кульки повітря в присутності студентів. Кулю викидаємо. Відчуваємо запах, який був нанесений на тканині (хай одеколону).

Звідки в повітрі запах одеколону? Повітря з кулі? Ймовірно, що молекули одеколону, які вільно рухались в повітрі під посудом, проникли і в кулю, пройшовши гумову перегородку. Це є дифузія в газах. Дослід показав, що швидкість дифузії обернено пропорційна квадратному кореню з густини газу.

2.5.4 Дифузія в рідинах

Наповнимо водою майже доверху високий скляний посуд (мензурку). За допомогою трубки наллємо на дно мензурки концентрований розчин мідного купоросу. Видно, що розчин купоросу, який має більшу густину, ніж вода, відділяється чіткою межею від води. Через декілька днів побачимо, що блакитна окраска від купоросу піднялась догори. З часом, це буде розчин з блакитною окраскою. Це переміщення важкої рідини і проникнення в міжмолекулярний простір більш легкої рідини і буде дифузією в рідині. Згідно з теорією молекулярної будови тіла, мідний купорос з важкими молекулами має власний рух молекул, що і приводить до проникнення в молекулярний простір легкої рідини. Цей дослід можна

проводити з чорнилами та водою, розчином марганцівки, та іншими розчинами. Особливо цікаво провести дослід зі змішуванням води та етиленового спирту. Змішуємо 100 % спирт та воду. Візуально майже нічого не спостерігається. Тільки прилад, ареометр, покаже, що спирт розчинився в воді. Цікаво бачити, що дифузія швидше проходить при нагріванні газів, так і рідин.

2.5.5 Дифузія в твердих тілах

Цей вид дифузії спостерігати складніше, ніж розглядати дифузію в газах та рідинах. Ця складність полягає в молекулярній будові твердих тіл, та зв'язками між молекулами. А все таки дифузія в твердих тілах існує. Зробимо дослід, а результат дослідження побачимо через декілька місяців або років.

Притерти і міцно притиснути одну до одної пластини золота та свинцю. За п'ять років пластини “зростаються” за рахунок взаємного проникнення молекул на глибину до 1 міліметра.

Цей дослід можна прискорити і не чекати 5 років, а тримати пластини в нагрітому стані: чим вища температура, тим інтенсивніше іде процес дифузії.

З літератури відомо, що деякі матеріали пластин, які скріплюють міцно і пропускають електричний струм, теж дифундують між собою. Між ними проходить дифузія.

Також цікаво, електромонтери знають, що неможливо з'єднувати мідний та алюмінієвий дроти. Через деякий час алюмінієвий провід розсипається. Відомо, що при з'єднанні алюмінієвої та мідної дротин між цими матеріалами виникає контактна різниця потенціалів, протікає мікрострум, що робить таке з'єднання не стійким, тут також виникає дифузія. Таке з'єднання можливе з використанням залізної перемички.

2.6 Друге начало термодинаміки

Цей закон дає зв'язок між внутрішньою енергією тіла та роботою, виконаною тілом.

Визначення цього закону має декілька формулювань:

Неможливий процес, єдиним результатом якого є передача теплоти від менше нагрітого тіла до більше нагрітого (формулювання Клаузіуса).

Неможливий періодичний процес, єдиним результатом якого є перетворення теплоти, отриманої від нагрівача, в еквівалентну роботу (формулювання Кельвіна).

Другий закон термодинаміки знайшов застосування в теплових двигунах. Тепловий двигун – це механізм, який перетворює внутрішню енергію пального в механічну. Енергія, яка виділилась при згоранні пального, передається шляхом теплообміну будь – якому газу (повітрю).

При розширенні газу виконується робота проти зовнішніх сил, які приводять в рух певний механізм. В тепловому двигуні газ не може розширюватись безкінечно. Після розширення, газ мусить знову бути стиснутим і повернутись до початкового стану. Тепловий двигун працює циклічно, після розширення газу йде процес стискування. Основною умовою роботи теплового двигуна є таке: робота розширення газу на протязі одного циклу мусить бути більшою, ніж робота для стиснення газу. Температура газу при його стискуванні є нижчою, ніж при розширенні. Тоді тиск при стискуванні буде меншим за тиск при розширенні. Ці принципи положенні в основу роботи теплового двигуна. Проведемо ряд дослідів, коли при зміні внутрішньої енергії тіла, виконується робота.

Дослід 1. Кусочок заліза кладуть на дерев'яний брусок і свердять його деякий час. Щоб показати, що залізо нагрілося, до нього прикладають датчик напівпровідникового термометра, підготовленого для вимірювання температур від 0 до 400 градусів за Цельсієм. Залізо нагрілося, збільшилась його внутрішня енергія. Це сталося за рахунок механічної роботи, виконаній при свердлінні.

Дослід 2. Електродвигун закріплюють у тринозі універсального штатива. Кінець вала двигуна обгортають смужкою гнучкого картону, затискуючи її кінці. До смужки прикладають датчик напівпровідникового термометра, який показує значне підвищення температури. Якщо дослід повторити, густо змастивши перед цим картон і виступаючий кінець валу технічним вазеліном, то картон при обертанні майже не нагрівається. Цей дослід добре ілюструє значення змащення підшипників і демонструє перехід механічної енергії в теплову.

Дослід 3. Для цього досліду підбирають товстостінну посудину з достатньо широким тубусом і горловиною (дивись малюнок). Горловину і тубус щільно закривають гумовими корками. Через першу пропускають невеликий скляний патрубок, через другу - два кінця від термопару. Патрубок з'єднують з насосом, а термопару, через підсилювач - з гальванометром. Насосом нагнітають в склянку повітря. Звертають увагу, що усередині склянки при цьому ніяких помітних змін не відбувається. Стрілка гальванометра відхиляється, показуючи підвищення температури. Роблять ще декілька рухів штоком поршня насоса і помічають ще більше відхилення стрілки. Йде нагнітання повітря, тобто, здійснюється робота по стисненню повітря. Повітря нагрівається, збільшується його внутрішня енергія. Приходять до висновку, що при здійсненні роботи по стисненню повітря, відбувається його нагрівання, внутрішня енергія повітря збільшується.

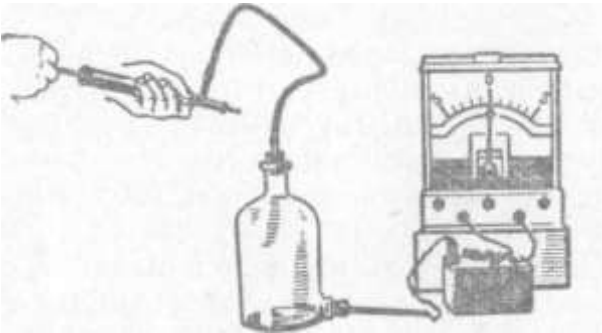


Рисунок 2.9 – При нагнітанні повітря в посудину збільшується тиск і росте температура

Дослід 4. Демонструють дослід з нагріванням металеві трубки під час тертя шнуром. Тонкостінну латунну трубку, або гільзу патрона для мисливської рушниці, міцно затискають в тринозі універсального штатива. Обернувши один раз навколо трубки міцний м'який шнур, беруться удвох за його кінці і роблять зворотно-поступальні рухи до тих пір, коли трубка починає нагріватися. Для спостереження за нагріванням, слід скористатися термопарою, помістивши її всередину трубки.

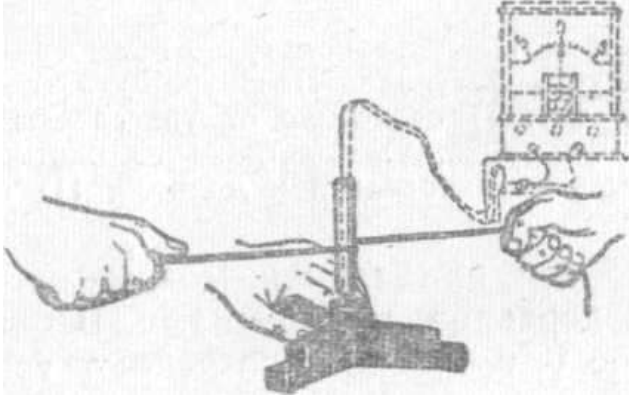


Рисунок 2.10 – Перетворення механічної енергії тертя в теплову енергію нагрівання води.

Дослід 5. Необоротність теплових процесів. Дослід показує, що теплові явища майже завжди мають властивості необоротності. Так, наприклад, якщо поряд знаходяться два тіла, з яких одне тепліше за інше, то їх температури поступово вирівнюються, тобто, тепло "само собою" перетікає від теплішого тіла до холоднішого. Проте, зворотний перехід теплоти від холоднішого тіла до нагрітого, який може бути здійснений в холодильній машині, не йде "сам собою". Для здійснення такого процесу потрібна витрата енергії ще якого-небудь тіла, що приводить до зміни стану цього тіла. Отже, умови оборотності не виконуються. Шматочок цукру, вміщений в гарячий чай, розчиняється в ньому, але ніколи не буває, щоб з гарячого чаю, в якому вже розчинений шматочок цукру, він виділювався і знов зібрався у вигляді шматочка. Звичайно, одержати цукор, випарувавши його з розчину, можна. Але цей процес супроводжується змінами в навколишніх тілах, що свідчить про необоротність процесу розчинення. Необоротним є і процес дифузії. Взагалі, прикладів необоротних процесів можна навести досить багато. По суті, будь-який процес, що протікає в природі в реальних умовах, є необоротним.

2.7 Принцип дії теплового двигуна

Для демонстрації дії теплового двигуна робимо дослід. Установка для дослідження збирається за малюнком. У металеву трубку наливають 3-4 мл води і щільно закривають гумовим корком, якого необхідно прив'язати до штатива міцною ниткою, завдовжки приблизно 50 - 60 см. Трубку закріплюють в муфті штатива з нахилом, щоб вода в ній змочувала бічні стінки для зручності нагрівання.



Рисунок 2.11 – Перетворення теплової енергії горіння спирту в механічну енергію корка

Під трубку, на металевому кільці штатива, ставлять спиртівку, полум'я спиртівки повинне торкатися трубки. Через деякий час вода в трубці нагріється, тиск пари зросте і корок з шумом вилетить з трубки. Студентам пояснюють, що здійснена паровою робота, виконувалася за рахунок енергії палива (згорання спирту). Подібне перетворення енергії палива в механічну енергію відбувається в теплових двигунах.

Для демонстрування принципу дії активної парової турбіни складають установку, зображену на малюнку (Рис. 2.12, а). Скляну трубочку (діаметром 3-4 мм) у вигляді букви Г пропускають крізь отвір у корку, яким закривають пробірку з наливою в неї водою. Прилад закріплюють на штативі. Поблизу відтягнутого кінця трубочки, встановлюють крильчатку, виготовлену з цупкого паперу або жерсті. Віссю турбіни є голка або дротинка, що обертається в двох "підшипниках" - дротяних кілечках. Струмінь пари, який виходить із сопла (відтягнутого кінця трубочки), обертає турбіну з певною швидкістю.

Для демонстрування принципу дії реактивної турбіни беруть дві скляні трубки, зігнуті під кутом, пропускають їх крізь отвори в корку, яким закривають колбу з наливою в неї гарячою водою (Рис. 2.12, б). Колбу підвішують на довгій нитці до штатива (найкраще взяти дві паралельні нитки, розташовані на віддалі 3–4 мм). При нагріванні води в колбі виникає пара, яка виходить з кінців трубок, примушує прилад обертатись у напрямі, протилежному напрямку витікання пари.

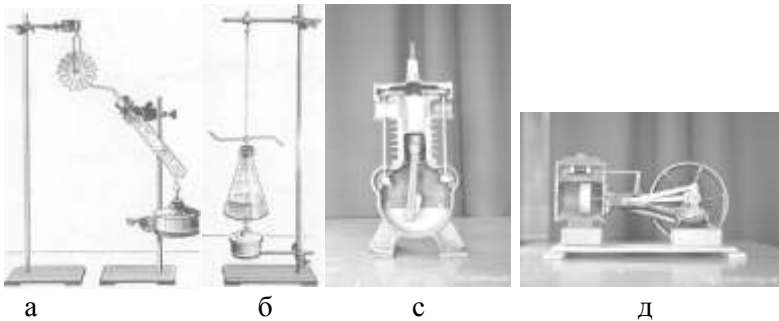


Рисунок 2.12 – Моделі різних видів теплових двигунів

На рисунку зображені дослідні установки, які демонструють перетворення теплової енергії пари в механічну енергію – “а”, “б” та механічні моделі існуючих двигунів: внутрішнього згорання “с”, де теплота згорання рідкого палива переходить в механічну енергію поршня; та модель парового двигуна “д”. В цьому двигуні тепла енергія водяної пари перетворюється в поступальний рух поршня.

Двигун Стірлінга

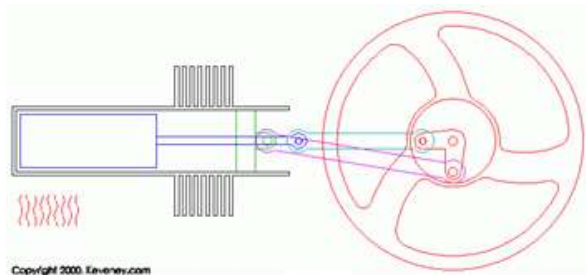
Основні принципи термодинаміки лягли в основу роботи двигуна Стірлінга. Двигун Роберта Стірлінга є двигуном зовнішнього згорання, тобто, тепло підводиться двигуну ззовні. Зовнішнє тепло – це продукт згорання рідких або твердих палив; тепло, що йде від нагрітих тіл, сонячне випромінювання, та інші види тепла є джерелом енергії для двигуна Стірлінга. Більшість двигунів, що використовуються в промисловості, є двигунами внутрішнього

згорання. Рідке або газоподібне паливо, згораючи всередині двигуна, дає тепло, яке виконує роботу. Коефіцієнт корисної дії таких двигунів приблизно 40 %. При згоранні робочої суміші виділяється чадний газ. В двигуні Стірлінга ці недоліки відсутні.

Двигун Стірлінга існує з 1816 року. Автору винаходу на той час було 26 років. В ті часи такі двигуни використовували для відкачки води з шахт. Зараз іде друга хвиля впровадження двигунів Стірлінга в промисловості. Зовнішній вид та одна із схем роботи двигуна Стірлінга показані на рис. 2.13.



a



б

Рисунок 2.13 – Двигун Стірлінга в робочому стані при освітленні та його схема роботи

На рисунку двигун зображений в перевернутому вигляді, (для зручності показу). Електролампа нагріває дно робочого циліндра. Від нагріву двигун працює. Робочий циліндр герметичний, його діаметр 8–10 см. В циліндрі є поршень, який щільно прилягає до стінок. Поршень може рухатися поступально і через систему важелів передавати рух маховику, який обертається.

Дно циліндра нагрілося. Тепло від дна нагріває повітря, яке міститься між дном та поршнем. Підвищується тиск в середині циліндра. Тепле повітря тисне на поршень. Поршень рухається і приводить в обертальний рух маховик. За цей час маховик зробить половину оберту. Як зробити повний оберт? Великий поршень необхідно вернути в початковий стан. Під поршнем тепле повітря. Воно буде заважати руху. Повітря необхідно охолодити. Для цього в камері, де великий поршень закінчує поступальний рух, ззовні є ребра жорсткості, які відводять тепло в атмосферу. В великому циліндрі, в верхній кришці, знаходиться менший циліндр з поршнем. Повітря між поршнями частково охолоджується. При зближенні поршнів тиск повітря збільшується і діє на більший поршень, який рухається тепер в початкове положення. В той же бік рухається і менший поршень під дією передачі від маховика. Великий поршень попадає в область нагрітого повітря, де тепло йде від дна циліндра. Тиск теплого повітря збільшується. Коли маховик зробить повний оберт, то великий поршень починає рухатись в протилежний бік, як на початку руху. Описаний один оберт маховика. Двигун працює далі.

Існує багато різновидів роботи таких двигунів. Для виготовлення двигуна використовується незначна кількість металу. Вони малошумні і прості в виготовленні.

2.8 Дослід Дарлінга з аніліном

Нагадуємо, що анілін - це масляниста рідина, органічна сполука ($C_6H_5NH_2$) без кольору і запаху, не розчинна у воді, щільність якої при $150\text{ }^{\circ}C$ дорівнює $1,21\text{ кг/м}^3$. Для проведення досліду потрібна електроплита, хімічна склянка з водою та анілін.

Дослід проводять так: у хімічну склянку, що перебуває на розігрійтій електроплитці, вливають анілін (дослід готують заздалегідь). Поки температура аніліну менше температури води, він перебуває на дні склянки. При нагріванні анілін розпадається на більші краплі, які спливають на поверхню води і охолоджуються. Щільність аніліну збільшується і краплі знову опускаються на дно склянки. Цей процес повторюється багаторазово.

У такий спосіб на прикладі циклічного теплового процесу демонструють неможливість створення вічного двигуна другого роду (теплового двигуна). Для здійснення циклічних процесів необхідні нагрівач і холодильник. У нашому досліді роль нагрівача відіграє електроплитка й гаряча вода, холодильника – навколишнє повітря, а робочого тіла – анілін.



Рисунок 2.14 – Дослід Дарлінга

2.9 Теплове розширення

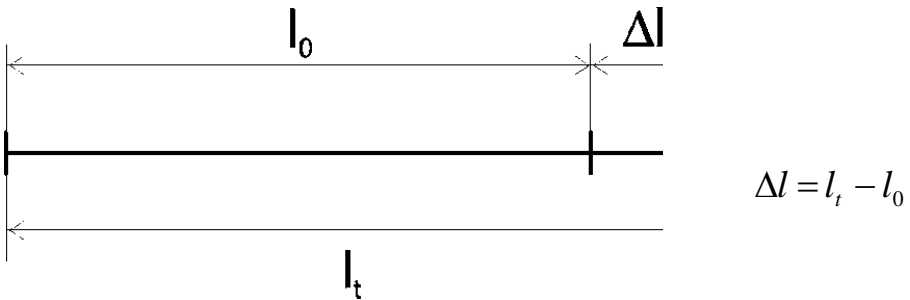
Зміна розміру та форми тіла при нагріванні, називається тепловим розширенням. Розрізняють лінійне та об'ємне розширення:

а) Лінійне розширення – це зміна одного певного розміру твердого тіла.

Δl – абсолютне значення зміни розміру показує на скільки змінилися розміри тіла. Для порівняння зміни розмірів тіла різних початкових довжин, вводять поняття відносної деформації ε .

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} 100\%$$

Відносна деформація показує у скільки разів змінились розміри тіла порівняно з початковими.



l_0 – довжина тіла при 0°C . l_t – довжина тіла при певній температурі.

Величину деформації тіла при його нагріванні визначають за формулою:

$$\Delta l = \alpha l_0 \Delta t$$

$\Delta t = t_2 - t_1$ – різниця температур; t_2 – кінцева температура нагріву тіла; t_1 – початкова температура тіла; α – коефіцієнт лінійного розширення (для кожного матеріалу визначаємо по таблицям).

Знаючи початкові розміри тіла, вид матеріалу та температуру нагріву, можна визначити кінцеві розміри тіла за формулою:

$$l_t = l_0(1 + \alpha \Delta t)$$

Для демонстрації лінійного розширення твердих тіл використовують установку (рис. 2.15).

На металевій основі змонтована електроплитка (циліндричний керамічний резистор), ззовні закрита кожухом. В отвір резистора вставляють металевий стержень для дослідження його видовження. Величину деформації тіла вимірюють за допомогою мікрометра, який прикріплений до штатива установки. Кінці досліджуваного зразка упираються в дно плити та в рухомий стержень мікрометра. Температуру можна вимірювати термометром або термопарою, які знаходяться в електроплитці. Точність вимірювання мікрометра 0,01 мм.



Рисунок 2.15 – Пристрій для демонстрації лінійного розширення твердих тіл

б) Об'ємне розширення – це зміна об'єму тіла під час нагрівання.

Абсолютне значення зміни об'єму тіла при нагріванні визначають за формулою:

$$\Delta V = V_t - V_0$$

V_0 – об'єм при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, V_t – об'єм при певній температурі.

Значення об'єму тіла при його нагріванні до певної температури визначається формулою:

$$V_t = V_0(1 + \beta\Delta t)$$

β – коефіцієнт об'ємного розширення.

Зв'язок між коефіцієнтом лінійного і об'ємного розширення тіла такий:

$$\beta = 3\alpha$$

При нагріванні тіл змінюється їхня площа поверхні. Площу поверхні будь-якого тіла при нагріванні визначають за формулою:

$$S_t = S_0(1 + 2\alpha\Delta t)$$

де S_t – площа тіла при певній температурі, S_0 – початкова площа тіла.

Експериментально розглянемо зміну площі тіла при нагріванні. До кронштейна на металевому ланцюжку кріпиться металева кулька, діаметром до 30 мм (рис. 2.16). Під кулю знаходиться столик, у вигляді плоскої пластини з отвором в центрі. В холодному стані кулька вільно проходить через отвір в столику. Якщо кульку нагріти, то її об'єм збільшиться і вона через отвір не пройде. Кулька лежить на отворі. Змінились розміри кульки, діаметр кульки збільшився.



Рисунок 2.16 – Пристрій для демонстрації розширення твердих тіл

Розширення тіл при нагріванні і стискуванні при охолодженні в природі відіграють величезну роль. Нерівномірне прогрівання повітря біля поверхні Землі створює конвекційні потоки, які зумовлюють зміну погоди. Нерівномірне прогрівання води в морях і океанах створює течії, які впливають на клімат прибережних країн, особливо в гірських місцевостях. Це призводить до розширення і стискання гірських порід. Оскільки, такі зміни об'єму залежать від роду речовини, то в гірських породах, що мають складну будову, виникають тріщини, які поступово збільшуються, тобто ці породи руйнуються.

У побуті і техніці залежність густини речовини, довжини і об'єму тіл від температури, також має дуже велике значення. Залежність густини повітря від температури використовується в квартирах для рівномірного розподілу тепла, яке виділяють печі і радіатори, у грубах – для створення тяги, у холодильниках – для рівномірного охолодження камери. Залежність густини повітря від температури доводиться враховувати при натягуванні проводів на лініях електропередачі, під час прокладання паропроводів і залізничних рейок, тощо. При спорудженні мостів, суден, та при з'єднанні товстих листів металу використовують з'єднання заклепками. Нагрівання металу робить заклепки більш пластичними і вони щільніше забезпечують з'єднання.

Важливу роль в житті живих організмів відіграє вода. В воді виникло життя. На Землі можуть бути температури як високі, так і низькі, в яких неможливе життя. Високі температури гасяться водою та вологістю повітря. Течія Гольстрім охолоджує дно океану і дає життя водним організмам та населенню прибережних країн. Відомо, що густина води найбільша при температурі +4 градуса. Охолоджена вода опускається до низу і живі організми живуть в таких умовах. Верхні шари води мають меншу густину, ніж при +4 градусах. Вони охолоджуються і замерзають, утворюючи міцне покривало для води. Холод не проникає до дна водойм.

СПИСОК ВИКОРИСТОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Єлізаров О.І., Закатнов М.В. ДЕМОНСТРАЦІЯ СТАТИСТИЧНИХ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ В КУРСІ ЗАГАЛЬНОЇ ФІЗИКИ Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського. Випуск 6/2007 (47). Частина 1.
2. Навчальне видання. КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙНИХ ДЕМОНСТРАЦІЙ для студентів фізичного факультету. Д. Д. Поліщук, С. А. Шиндер. Редакційно–видавничий Центр Одеського національного університету імені І.І. Мечникова.