

ЗМІСТ КУРСУ «ТЕРМОДИНАМІКА ТА МОЛЕКУЛЯРНА ФІЗИКА»

Тема 1. Предмет та метод термодинаміки. Основні поняття. [1-4,8,9]

- 1.1. Вступ. Предмет та методи термодинаміки та статистичної фізики.
- 1.2. Молекулярна будова речовини.
- 1.3. Основні поняття термодинаміки.
- 1.4. Термодинамічні тіла та системи тіл.
- 1.5. Термодинамічна рівновага тіла. Нульовий принцип термодинаміки. Зовнішні та внутрішні параметри.
- 1.6. Поняття температури.
- 1.7. Термометрія. Ідеально-газова шкала температур.
- 1.8. Рівняння стану. Приклади рівнянь стану
- 1.9. Рівняння стану ідеального газу.

Тема 2. Перший принцип термодинаміки [1-4,8]

- 2.1. Квазістатичні процеси. Графічне зображення квазістатичних процесів.
- 2.2. Рівняння стану в загальному випадку. Термодинамічні співвідношення для квазістатичних процесів. Внутрішня енергія як функція стану.
- 2.3. Макроскопічна робота.
- 2.4. Закон Гесса. Кількість теплоти.
- 2.5. Перший принцип термодинаміки. [1-4,8]
- 2.6. Поняття ентальпії.
- 2.7. Зворотні та незворотні процеси. Колові процеси.
- 2.8. Теплоємність. Співвідношення Роберта Майєра.
- 2.9. Теплоємність газів при різних температурах.
- 2.10. Рівняння адіабати для ідеального газу.
- 2.11. Швидкість розповсюдження звуку в газах.

Тема 3. Другий принцип термодинаміки [1-4,8]

- 3.1. Теплова машина.
- 3.2. Постулат Клаузіуса.
- 3.3. Постулат Томпсона-Планка
- 3.4. Еквівалентність постулатів Клаузіуса та Томпсона-Планка.
- 3.5. Цикл Карно, теорема Карно.
- 3.6. Термодинамічна шкала температур. Абсолютний нуль температур. Від'ємні температури
- 3.7. Тотожність ідеально-газової та термодинамічної шкали температур.
- 3.8. Незворотні процеси.
- 3.9. Нерівність Клаузіуса.
- 3.10. Друга теорема Карно.
- 3.11. Рівність Клаузіуса. Ентропія.
- 3.12. Закон зростання ентропії
- 3.13. Ентропія як повний диференціал. Вираз для ентропії ідеального газу.
- 3.14. Вільна енергія Гельмгольца. Термодинамічні потенціали.
- 3.15. Парадокс Гіббса. Ентропія за Больцманом.
- 3.16. Третій закон термодинаміки (теорема Нернста). Поведінка ентропії та теплоємності тіл за низьких температур.

Тема 4. Реальні гази [1,8,9]

- 4.1. Рівняння Ван-дер-Ваальса.
- 4.2. Ізотерма реального газу.
- 4.3. Критичні параметри. Закон відповідних станів.
- 4.4. Ефект Джоуля-Томпсона.
- 4.5. Методи отримання низьких температур.

Тема 5. Фазові перетворення [1,8,9]

- 5.1. Термодинамічні фази.

- 5.2. Фазові перетворення першого роду.
- 5.3. Рівновага фаз. Формула Клайперона-Клаузіуса.
- 5.4. Фазові діаграми. Критичні точки.
- 5.5. Правило фаз Гібса
- 5.6. Симетрія кристалів. Фазові перетворення другого роду.

Тема 6. Поверхневі явища [1-4,8]

- 6.1. Формула Лапласа.
- 6.2. Температурна залежність коефіцієнта поверхневого натягу.
- 6.3. Явища змочування. Кут змочування.
- 6.4. Формула Жюрена (капілярні явища).
- 6.5. Тиск насиченої пари над викривленою поверхнею. Формула Вільяма-Томсона.
- 6.6. Процес кипіння.

Тема 7. Основи молекулярної фізики [5-8]

- 7.1. Експериментальні основи молекулярної фізики.
- 7.2. Основні положення молекулярно-кінетичної теорії.
- 7.3. Основне рівняння кінетичної теорії газів.
- 7.4. Динамічні та статистичні закономірності, термодинамічна ймовірність.
- 7.5. Максвелівський закон розподілу швидкостей. Середня, середньо-квадратична та найбільш вірогідна швидкість молекул газу. Експериментальна перевірка Максвелівського закону розподілу швидкостей.
- 7.6. Розподіли Больцмана та барометрична формула. Розподіл Гіббса.
- 7.7. Ентропія з молекулярно-кінетичної точки зору. Стала Больцмана.
- 7.8. Флуктуації. Статистична вірогідність термодинамічних закономірностей. Залежність флуктуацій від кількості частинок (на прикладі ідеального газу).

Тема 8. Елементи кінетики та процеси переносу[5-8]

- 8.1. Браунівський рух. Формула Ейнштейна.
- 8.2. Визначення числа Авогадро за спостереженням браунівського руху. Експерименти Перрена.
- 8.3. Число зіткнень та середня довжина вільного пробігу молекул. Газо-кінетичний діаметр молекули та його визначення.
- 8.4. Дифузія, теплопровідність, внутрішнє тертя та їх молекулярно-кінетичне трактування.
- 8.5. Кінетичні коефіцієнти та їх зв'язок із молекулярними характеристиками газу.
- 8.6. Молекулярна течія газу. Особливості явищ переносу в ультрарозріджених газах.

Рекомендована література

1. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Т.2, Термодинамика й молекулярная физика. -М.: Наука, 1979.
2. Ландау Л. Д., Ахиезер А. Й., Лифшиц Е. М. Курс общей физики. - М.: Наука, 1975.
3. Савельев Й. В. Курс физики. Т.І. - М.: Наука, 1977.
4. Кикоин Й. К., Кикоин А. К. Молекулярная физика. - М.: Наука, 1971.
5. Рейф Ф. Статистическая физика (БКФ, т.5). - М.: Мир, 1972.
6. Фейнман Р., Лейтон Р., Сендо Н. Фейнмановские лекции по физике, выш. 4. - М.: Мир, 1967.
7. Матвеев А. Н. Молекулярная физика. - М.: Высшая школа, 1987 (и позже).
8. Базаров Й. П. Термодинамика. - М.: Высшая школа, 1983 (и позже).
9. О.В.Гомонай, М.В.Грайворонський, Г.Є.Монастирський,. Лабораторний практикум з термодинаміки. К., Фіз.-тех. НТУУ "КШ". 1997.

ТЕМАТИКА РОЗРАХУНКОВО ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ

Тема	Обов'язкові задачі	Додаткові задачі
Температура. Рівняння стану. Термодинамічна рівновага. Суміші газів. Закон Дальтона	31, 61, 63, 82, 83. <i>KPC</i> : 2.2	<i>KPC</i> : 2.1, Φ :1
Перший принцип термодинаміки. Енергія, теплота, робота. Теплоємність. Адіабата Пуассона. Швидкість звуку в газах.	85, 84, 89, 91, 94, 128, <i>KPC</i> : 2.5	367, 128, <i>KPC</i> : 2.8, 2.11
Другий принцип термодинаміки. Цикли. Рівняння Клаузіуса.	159, 174, 176, 195, 198; <i>KPC</i> : 2.24; Φ :6	<i>KPC</i> : 2.18, 2.30; Φ :5
Ентропія зворотніх та незворотніх процесів.	211, 215, 218, 219, 223; <i>KPC</i> : 2.27, 2.33.	<i>KPC</i> : 2.35; Φ :7,8
Термодинамічні потенціали. Співвідношення Максвелла	225, 236, 245, 253; Φ :9; <i>KPC</i> : 2.37, 2.38	<i>KPC</i> : 2.32. Φ :10, 11
Ван-дер-Ваальсовий газ. Ефект Джоуля-Томсона.	460, 471, 474, 480, 481, 489; <i>KPC</i> : 2.42; Φ :12, 13	465, Φ :14, 15, 16
Поверхневі явища.	496, 500, 503, 528	Φ :19
Фазові перетворення.	541, 542, 546, 571, 554; <i>KPC</i> : 2.97, 2.106; Φ :20	568; <i>KPC</i> : 2.92, 2.100; Φ :21, 22, 23
Максвеловий розподіл.	308, 316, 317, 327; <i>KPC</i> : 2.57, 2.60	332, 339; <i>KPC</i> : 2.63
Больцманів розподіл. Розподіл Гібса.	345, 347, 348; Φ :30	376; Φ : 28, 36
Статистичний зміст ентропії. Флюктуації.	388, 390, 399, 402; Φ :27	Φ : 29
Явища переносу. Явища переносу в розріджених газах.	264, 272, 417,433; <i>KPC</i> : 2.49, 2.80	<i>KPC</i> : 2.73, 2.80; Φ :33, 37, 38, 40

Примітки. Задачі цитуються за:

Сборник задач по общему курсу физики. Ч.1, Термодинамика и молекулярная физика. /Под ред. Д. В. Сивухина. - М.: Наука. - 1976. [*KPC*]: Козел С. М, Рашба Э. И., Славатинский С. А. Сборник задач по физике. М.: Наука. – 1987; [Φ]: Факультетські задачі; [*И*]: Иродов И.Е. Задачи по общей физике, М:Наука, 1988.

Задачі із завдання розбиті на групи відповідно до тематики практичних занять. Регулярне розв'язання задач значно полегшує здачу завдання та сприяє кращому засвоюванню матеріалу. Кожне завдання повинно бути оформлене в окремому зошиті; числові відповіді обов'язкові. “Відмінно” ставиться у разі виконання студентом додаткових завдань.

ПЕРЕЛІК ЗАДАЧ СЕМЕСТРОВИХ КОНТРОЛЬНИХ РОБІТ ПОПЕРЕДНІХ РОКІВ

Варіант 1.

- (7) Елементарна робота діелектрика в електричному полі \mathbf{E} визначається як $\delta A = -\mathbf{E}d\mathbf{D}$, де \mathbf{D} - вектор електричної індукції. Довести співвідношення для різниці теплоємностей

$$C_D - C_E = T \left(\frac{\partial E}{\partial T} \right)_D \left(\frac{\partial D}{\partial T} \right)_E$$

- (12) Студент Недбайло, виконуючи роботу 1 по вивченню закону Гей-Люссака (сталий тиск), забув вийняти корок з резервуара з ртуттю (див. опис лабораторної роботи). Знайти «закон Недбайла» $V(T)$.
- (16) У вертикальну циліндричну посудину, що містить 0,1 моля аргону за нормальних умов, обережно опускають легенький поршень масою 2 г з площиною перерізу 1 см² і відпускають його. Після кількох коливань поршень приходить у стан рівноваги, що відповідає меншому об'єму газу V та температурі T . Вважаючи процес адіабатичним, знайти різницю ентропій між початковим та кінцевим станом.
- (25) В тепловій машині робочим тілом є вода. Машина працює за циклом, що складається з двох ізотерм при $t_1=6^\circ\text{C}$, $t_2=2^\circ\text{C}$ та двох ізобар при $p_1=100$ атм, $p_2=1$ атм. Коефіцієнт лінійного розширення води в цьому діапазоні температур $\alpha = 1,5 \cdot 10^{-5} (^\circ\text{C}^{-1})$. Коефіцієнт ізотермічної стисливості $K = (1/V) \cdot (\partial V / \partial P)_T = -4,9 \cdot 10^{-5} \text{ атм}^{-1}$. Знайти кількість теплоти на ізотермах (з урахуванням знаку) та ккд циклу.

Варіант 2.

- (7) Елементарна робота парамагнетика в магнітному полі \mathbf{H} визначається як $\delta A = -\mathbf{H}d\mathbf{M}$, де \mathbf{M} - вектор намагніченості. Довести співвідношення для різниці теплоємностей

$$C_M = T \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_M \left(\frac{\partial M}{\partial T} \right)_H + C_H$$

- (12) Студент Скорочитайло, виконуючи роботу 1 по вивченню закону Амонтонса (сталий об'єм), забув вийняти корок з резервуара з ртуттю (див. опис лабораторної роботи). Знайти «закон Скорочитайла» $P(T)$.
- (16) Горизонтальну циліндричну посудину, що містить 0,2 моля азота за нормальних умов, закрито легеньким рухомих поршнем масою 3 г з площиною перерізу 3 см². На поршні знаходиться електричний заряд $2 \cdot 10^{-6}$ Кл. Після включення постійного електричного поля 100 В/см поршень починає коливатись, а потім приходить у стан рівноваги, що відповідає більшому об'єму газу V та температурі T . Вважаючи процес адіабатичним, знайти різницю ентропії між початковим та кінцевим станом.
- (25) В тепловій машині робочим тілом є вода. Машина працює за циклом, що складається з двох ізотерм при $t_1=6^\circ\text{C}$, $t_2=2^\circ\text{C}$ ізобари при $p_1=100$ атм та ізохори при $V=1$ л. Коефіцієнт лінійного розширення води в цьому діапазоні температур $\alpha = 1,5 \cdot 10^{-5} (^\circ\text{C}^{-1})$. Коефіцієнт ізотермічної стисливості $K = (1/V) \cdot (\partial V / \partial P)_T = -4,9 \cdot 10^{-5} \text{ бар}^{-1}$. Знайти кількість теплоти на ізотермах (з урахуванням знаку) та ккд циклу.

Варіант 3.

- (10) Знайти максимальну роботу, яку може виконати двигун, що працює за циклом 1-2-3, де 12-ізотерма, 23-політропа, 31-адіабата. Відомо, що теплоємність робочої речовини на політропі є C , а температури у точках 1 та 3 дорівнюють відповідно T_1 і T_3 .
- (15) 10 молей гелію, що знаходяться при температурі $T_1=300$ К, розширюються без підводу та віддачі тепла в порожній посуд кризь турбіну необоротним чином виконуючи роботу. Після встановлення рівноваги температура газу знижується до $T=200$ К. Після цього газ квазістатично стискають: спочатку ізотермічно, а потім адіабатично, повертаючи його у початковий стан. При стисканні газу витрачається робота $A=15$ кДж. Знайти зміну ентропії гелію при розширенні. При цих умовах гелій можливо вважати ідеальним газом.
- (25) Знайти $C_p - C_v$ для двох молей парів води. Вважати водяні пари газом Ван-дер-Ваальса зі сталими $a=0,554 \text{ Па} \cdot \text{м}^6 / \text{моль}^2$, $b = 30 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 / \text{моль}$.
- (25) В тепловій машині робочим тілом є вода. Машина працює за циклом, що складається з двох ізотерм при $t_1=6^\circ\text{C}$, $t_2=2^\circ\text{C}$ ізобари при $p_1=100$ атм та ізохори при $V=1$ л. Коефіцієнт лінійного розширення води в цьому діапазоні температур $\alpha = 1,5 \cdot 10^{-5} (^\circ\text{C}^{-1})$. Коефіцієнт ізотермічної стисливості $K = (1/V) \cdot (\partial V / \partial P)_T = -4,9 \cdot 10^{-5} \text{ бар}^{-1}$. Знайти кількість теплоти на ізотермах (з урахуванням знаку) та ккд циклу.

Варіант 4.

- (10) Знайти максимальну роботу, яку може виконати двигун, що працює за циклом Отто. Температури робочої речовини на ізотермах T_1 та T_2 відповідно. Відомо, що на ізотермі з температурою T_1 отримано тепло Q_1 . Теплоємність C_v робочої речовини залежить тільки від температури.
- (15) Теплоізований циліндричний посуд розділено невагомим поршнем на дві рівні частини. По один бік поршня знаходиться 0,5 моля азоту, а по другий – створено високий вакуум. Початкова температура $T_0 = 300$ К, тиск $P_0 = 1$ бар. Поршень відпускають, і він, вільно рухаючись, дає можливість газу заповнити весь об'єм циліндру. Після цього тиск на поршень збільшують, поступово доводячи об'єм газу до початкової величини. Знайти зміну внутрішньої енергії та ентропії газу в цьому процесі.
- (25) Знайти швидкість звуку в аргоні. Вважати аргон газом Ван-дер-Ваальса зі сталими $a=0,132 \text{ Па} \cdot \text{м}^6 / \text{моль}^2$, $b=32 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 / \text{моль}$.
- (25) В тепловій машині робочим тілом є вода. Машина працює за циклом, що складається з двох ізотерм при $t_1=6^\circ\text{C}$, $t_2=2^\circ\text{C}$ ізобари при $p_1=100$ атм та ізохори при $V=1$ л. Коефіцієнт лінійного розширення води в цьому діапазоні температур $\alpha = 1,5 \cdot 10^{-5} (^\circ\text{C}^{-1})$. Коефіцієнт ізотермічної стисливості $K = (1/V) \cdot (\partial V / \partial P)_T = -4,9 \cdot 10^{-5} \text{ бар}^{-1}$. Знайти кількість теплоти на ізотермах (з урахуванням знаку) та ккд циклу.

Варіант 5.

- (5) Знайти рівняння процесу (в змінних T і V), в якому теплоємність ідеального газу змінюється за законом $C = C_V + \alpha T$, де α - стала.
- (8) Яку максимальну роботу може виконати за цикл двигун з невідомою робочою речовиною, якщо він працює за циклом 1-2-3, де 1-2-ізотерма, 2-3-політропа, 3-1-адіобата. Відомо, що теплоємність робочої речовини на політропі є C , а температури у точках 1 та 3 дорівнюють відповідно T_1 і T_3 . Знайти максимальний к.к.д. який можна очікувати від цього двигуна.
- (13) Знайти $C_p - C_v$ для двох молей парів води, що знаходяться в об'ємі 10л при температурі $T=300\text{K}$. Вважати водяні пари газом Ван-дер-Ваальса зі сталими $a=0,554 \text{ Па}\cdot\text{м}^6/\text{моль}^2$, $b=3\cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{моль}$.

Варіант 6.

- (5) Знайти рівняння процесу (в змінних T і V), в якому теплоємність ідеального газу змінюється за законом $C = C_V + \beta V$, де β - стала.
- (8) Яку максимальну роботу може виконати за цикл двигун з невідомою робочою речовиною, якщо він працює за циклом 1-2-3-4, де 1-2 та 3-4 є ізотерми з температурами T_1 та T_2 відповідно, а 2-3 і 4-1 – ізохори. Відомо, що на ізотермі з температурою T_1 отримано тепло Q_1 . Теплоємність C_V робочої речовини залежить тільки від температури.
- (13) Знайти $C_p - C_v$ для ν молей парів води, що знаходяться в об'ємі V при температурі T . Вважати водяні пари газом Дітерічі зі сталими a і b . Рівняння стану Дітерічі є

$$P(V - vb) = \nu RT \cdot \exp\{-a / RTV\}$$

Варіант 7.

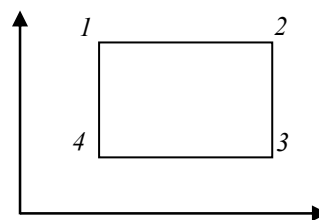
- (5) Знайти молярну теплоємність C ідеального газу, теплоємність C_V якого відома, як функцію його об'єму V , якщо газ виконує процес по закону: $T = T_0 e^{\alpha V}$, де α , T_0 – сталі.
- (9) Студент Недбайло, виконуючи роботу 1 по вивченню закону Гей-Люссака (сталий тиск), забув вийняти корок з резервуара з ртуттю (див. опис лабораторної роботи). Знайти «закон Недбайла» $V(T)$.
- (16) Яку максимальну роботу можна отримати від системи із двох тіл, що нагріто до різних початкових температур T_{10} та T_{20} ($T_{10} > T_{20}$), якщо теплоємність тіла, що слугує нагрівачем є C_1 , а холодильника C_2 , відповідно. Вважати, що теплоємності не залежать від температури. 1). Розглянути граничний випадок, коли теплоємність холодильника C_2 нескінченна. 2). Розглянути загальний випадок кінцевих C_1 та C_2 . Визначити в цьому випадку температуру T , яку будуть мати тіла доставши термодинамічної рівноваги.

Варіант 8.

- (5) Знайти молярну теплоємність C ідеального газу, теплоємність C_V якого відома, як функцію його об'єму V , якщо газ виконує процес по закону: $p = p_0 e^{\alpha V}$ де α , p_0 – сталі.
- (9) Студент Скорочитайло, виконуючи роботу 1 по вивченню закону Амонтонса (сталий об'єм), забув вийняти корок з резервуара з ртуттю (див. опис лабораторної роботи). Знайти «закон Скорочитайла» $P(T)$.
- (16) Яку максимальну роботу можна отримати від системи із двох тіл, що нагріто до різних початкових температур T_{10} та T_{20} ($T_{10} > T_{20}$), якщо теплоємність тіла, що слугує нагрівачем є C_1 , а холодильника C_2 , відповідно. Вважати, що теплоємності не залежать від температури. 1). Розглянути граничний випадок, коли теплоємність нагрівача C_1 нескінченна. 2). Розглянути загальний випадок кінцевих C_1 та C_2 . Визначити в цьому випадку температуру T , яку будуть мати тіла доставши термодинамічної рівноваги.

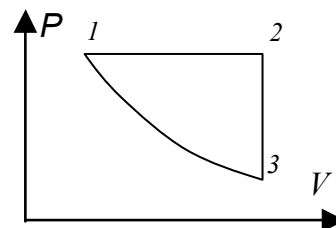
Варіант 9.

- (5) Наскільки змінюється температура ідеального газу, якщо його об'єм збільшується вдвічі за законом $PV^3 = \text{const}$. Яка його теплоємність у цьому процесі?
- (9) Цикл утворено із двох ізохор та двох ізобар. Як пов'язані між собою температури T_1 , T_2 , T_3 , T_4 в точках циклу 1, 2, 3, 4 для довільної речовини (не обов'язково ідеального газу) із сталими теплоємностями C_p та C_v ?
- (16) Із дослідів відомо, що при охолодженні на $\Delta T=20\text{K}$ гумового жгута, навантаженого тягарцем масою m , його довжина збільшується на 5 см. Яку кількість теплоти треба витратити, щоб ізотермічно при температурі $T=300\text{K}$ збільшити натягіння жгута σ на 1 Н?



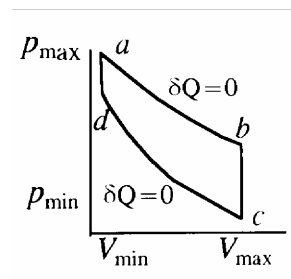
Варіант 10.

- (5) Наскільки зміниться температура ідеального газу, якщо його тиск зменшився вдвічі за законом $PV^{3/2} = \text{const}$. Яка його теплоємність у цьому процесі?
- (9) Цикл утворено із ізобари 1-2, ізохори 2-3 та адіабати 3-1. Як пов'язані між собою температури T_1 , T_2 , T_3 в точках циклу 1, 2, 3 для довільної речовини (не обов'язково ідеального газу) із сталими теплоємностями C_p та C_v ?
- (16) Із дослідів відомо, що при нагріванні на $\Delta T=10\text{K}$ гумового жгута із зафіксованою довжиною, його натягіння σ збільшилося на 2 Н. Яку кількість теплоти треба витратити, щоб ізотермічно при температурі $T=300\text{K}$ збільшити його довжину на 0.5 м?

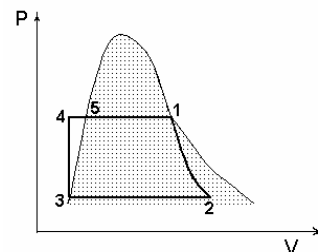


ПЕРЕЛІК ЗАДАЧ МОДУЛЬНОЇ КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ

1. Студент Недбайло, виконуючи роботу №1 по вивченню закону Гей-Люссака (сталий тиск), забув вийняти корок з резервуара з ртуттю (див. опис лабораторної роботи). Знайти «закон Недбайла» $V(T)$.
2. Знайти роботу, яку виконує рівноважне теплове випромінювання абсолютно чорного тіла в циклі Карно. Тиск випромінювання $p=U/3$, де $U=\sigma T^4$ - щільність енергії випромінювання, σ – відома константа.
3. Корисною величиною, що характеризує теплові двигуни є середній індикаторний тиск $P_{in} = A/(V_{max}-V_{min})$. Порівняйте відношення $(P_{max}-P_{min})/P_{in}$, яке реалізується в циклах Карно та Отто. Що воно характеризує? Поясніть, чому цикл Карно не знайшов широкого застосування. Для обох циклів $T_{max}=2000\text{K}$, $T_{min}=300\text{K}$, $P_{min}=1\text{ атм.}$, $V_c/V_d=2,73$. Робоча речовина – 1 моль повітря.
4. Зворотній замкнений процес перетворення теплоти на роботу складається із процесу 1–2, в якому теплоємність пропорційна температурі та змінюється від значення $C_1 = 20\text{ Дж/моль}\cdot\text{K}$ до $C_2 = 50\text{ Дж/моль}\cdot\text{K}$, та адіабати 2–3 та ізотерми 3–1. Визначити коефіцієнт корисної дії цього циклу. Рівняння стану робочого тіла невідоме.
5. Яку максимальну роботу можна отримати від системи із двох тіл, що нагріто до різних початкових температур T_{10} та T_{20} ($T_{10} > T_{20}$), якщо теплоємність тіла, що слугує нагрівачем є C_1 , а холодильника C_2 , відповідно. Вважати, що теплоємності не залежать від температури. Розглянути граничний випадок, коли теплоємність холодильника C_2 нескінченна та загальний випадок кінцевих C_1 та C_2 . Визначити в цьому випадку температуру T , яку будуть мати тіла діставши термодинамічної рівноваги.
6. Знайти максимальну роботу, яку може виконати двигун, що працює за циклом Отто. Температури робочої речовини на ізотермах T_1 та T_2 відповідно. Відомо, що на ізотермі з температурою T_1 отримано тепло Q_1 . Теплоємність C_V робочої речовини залежить тільки від температури.
7. У вертикальну циліндричну посудину, що містить 0,1 моля аргону за нормальних умов, обережно опускають легенький поршень масою 2 г з площиною перерізу 1 см^2 і відпускають його. Після кількох коливань поршень приходить у стан рівноваги, що відповідає меншому об'єму газу V та температурі T . Вважаючи процес адіабатичним, знайти різницю ентропії між початковим та кінцевим станом.
8. 50 г молока з температурою T_1 повільно вливають в 250 г рідкої кави з температурою T_2 . Їх питомі теплоємності можна вважати такими ж, як у води: $c = 4,2 \cdot 10^3\text{ Дж/(K}\cdot\text{моль)}$. Якою буде температура суміші? Чому дорівнює зміна ентропії?
9. Із дослідів відомо, що при охолодженні на $\Delta T=20\text{K}$ гумового жгута, навантаженого тягарцем масою m , його довжина збільшується на 5 см. Яку кількість теплоти треба витратити, щоб ізотермічно при температурі $T=300\text{K}$ збільшити натягіння жгута σ на 1 Н?
10. В тепловій машині робочим тілом є вода. Машина працює за циклом, що складається з двох ізотерм при $t_1=6^\circ\text{C}$, $t_2=2^\circ\text{C}$ та двох ізобар при $p_1=100\text{ атм.}$, $p_2=1\text{ атм.}$ Коефіцієнт лінійного розширення води в цьому діапазоні температур $\alpha = 1,5 \cdot 10^{-5}\text{ (}^\circ\text{C}^{-1})$. Коефіцієнт ізотермічної стисливості $K=(1/V) \cdot (\partial V / \partial P)_T = -4,9 \cdot 10^{-5}\text{ атм}^{-1}$. Знайти кількість теплоти на ізотермах (з урахуванням знаку) та ккд циклу.
11. Елементарна робота діелектрика в електричному полі \mathbf{E} визначається як $\delta A = -\mathbf{E} d\mathbf{D}$, де \mathbf{D} – вектор електричної індукції. Довести співвідношення для різниці теплоємностей $C_D - C_E = T \left(\frac{\partial E}{\partial T} \right)_D \left(\frac{\partial D}{\partial T} \right)_E$.
12. Моль газу адіабатично та квазістатично розширюється від початкового об'єму V_0 до об'єму V . В якому випадку охолодження газу буде більшим – якщо газ ідеальний або якщо він підкоряється Ван-дер-Ваальсову рівнянню? Вважати, що теплоємності обох газів однакові та не залежать від температури.
13. Для ізотермічного стискання одного моля Ван-дер-Ваальсового газу виконали роботу A . За цього процесу ентропія газу змінилася за абсолютною величиною на $R/8$, де R – універсальна газова стала. Знайти температуру ізотерми T , якщо початковий об'єм газу у тричі перебільшував критичний. Ван-дер-Ваальсові сталі a та b вважати відомими.
14. Обчислити, у скільки разів змінення температури за процесу Джоуля-Томсона відрізняється від змінення температури за адіабатичного розширення Ван-дер-Ваальсового газу. Різниця тиску в обох випадках однакова й невелика, $T_{кр}/T=0,4$, $V_{кр}/V=0,9$, де $T_{кр}$ та $V_{кр}$ - критична температура та об'єм, відповідно.



15. Ван-дер-Ваальсовий газ адіабатично розширюється в порожнину від об'єму V_0 до об'єму $2V_0$, а потім його ізотермічно стискають до об'єму $V_0/2$. Знайти змінення ентропії ΔS одного моля газу. Вважати, що сталі a , b та C_V відомі.
16. Знайти швидкість звуку в аргоні. Вважати аргон газом Ван-дер-Ваальса зі сталими $a=0,132 \text{ Па}\cdot\text{м}^6/\text{моль}^2$, $b=32\cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{моль}$.
17. Знайти C_p-C_V для двох молей парів води. Вважати водяні пари газом Ван-дер-Ваальса зі сталими $a=0,554 \text{ Па}\cdot\text{м}^6/\text{моль}^2$, $b=30\cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{моль}$.
18. У вертикальному циліндрі під масивним поршнем площиною S знаходиться один моль газу Ван-дер-Ваальса, для якого стала b відома. Знайти частоту ω малих коливань поршня коло положення рівноваги, вважаючи процеси стискання та розрідження ізотермічними. $T=T_{\text{критич}}$. Рівноважний об'єм газу в умовах експерименту вважати рівним критичному. Зовнішнім тиском знехтувати.
19. У воду з коефіцієнтом поверхневого натягу $\sigma=0,73 \text{ Н/м}$ обережно опустили трубку діаметром $d=20 \text{ мкм}$ таким чином, щоб вона торкалась поверхні. Визначити кількість теплоти, що виділилась після встановлення рівноваги. Кут змочування дорівнює $\alpha=30^\circ$. Відповідь обґрунтувати.
20. Крапля води масою $m=0.1 \text{ г}$, яку помістили між двома паралельними пластинами, утримує нижню пластину вагою $M=1 \text{ Кг}$. Зовнішній тиск становить $P_0=1.013\cdot 10^5 \text{ Па}$. Теплота випаровування води $\lambda=41 \text{ кДж/моль}$. Яка встановилась відстань d між пластинами, якщо температура кипіння краплі T відрізняється від температури кипіння води на 0.1°C .
21. В теплоізоляованому циліндрі з поршнем знаходиться невелика кількість рідкого гелію. Гелій знаходиться у рівновазі із своєю парою. Температура гелію $T=4,2 \text{ К}$. Поршень повільно пересувають, доки весь гелій не випариться. Відносне збільшення об'єму гелію внаслідок такого процесу дорівнює $\Delta V/V=0,02$. Визначити відносне змінення тиску $\Delta p/p$ пари гелію, вважаючи його ідеальним газом. Теплота випаровування гелію $\lambda=21,8 \text{ Дж/г}$. Вважати, що на початку експерименту маса пари значно більша за масу рідкого гелію.
22. Повітря при 40°C містить водяну пару з парціальним тиском (тиск насиченої пари) $P_0=0,075 \text{ ат}$. При адіабатичному розширенні повітря охолоджується до 10°C . При цьому тиск водяної пари зменшується до $P_1=0,012 \text{ ат}$. Визначити, яка частина водяної пари конденсується при цьому у вигляді туману. Теплота випаровування води при 10°C $\lambda=592 \text{ ккал/кг}$.
23. Розрахувати **ккд** парової машини, що працює за циклом 1-2-3-4-5-1, який зображено на рисунку (заштриховано область двохфазних станів). Переходи 1-2 та 3-4 відбуваються адіабатично. Відомо, що температура в точці 1 $T_1=383^\circ\text{K}$, а в точці 3 $T_3=283^\circ\text{K}$; маса води $m=15 \text{ кг}$. Воду вважати нестисливою рідиною. Теплота пароутворення води 2250 Дж/г .
24. Кисень дроселює через вентиль і при цьому він охолоджується зустрічною течією газу (машина Лінде). Процес теплообміну відбувається при сталому тиску. Початкова температура кисню $T_0=273 \text{ К}$, кінцева температура $T_1=90 \text{ К}$ відповідає температурі зрідження газу. В описаному процесі тиск кисню падає від $P_0=250$ до $P_1=1 \text{ атм.}$, що відповідає зменшенню температури в процесі Джоуля-Томсона на $\Delta T=75 \text{ К}$. Знайти долю кисня, що зріджується. Теплоємність кисню при сталому тиску $C_p=3,5R$, теплота випаровування $Q=51 \text{ ккал/кг}$.
25. Колба наповнена газоподібним гелієм при температурі 10°K (вище критичної точки) та термоізоляована. Газ може поволі витікати крізь капілярну трубку до тих пір, поки тиск у колбі не стане дорівнювати 1 атм , а температура $4,2^\circ\text{K}$ (точка кипіння гелію). Вважаючи газ ідеальним, знайти початковий тиск газу у колбі $P_{\text{ін}}$, якщо у кінці процесу колба повністю наповнена рідким гелієм. Молярна теплота випаровування для He при температурі $4,2^\circ\text{K}$ дорівнює 20 кал/моль . Для газоподібного гелію $C_V=3 \text{ кал/(моль}\cdot\text{град)}$.
26. Після демонстрації критичного стану речовини ампула, яку було заповнено ефіром, охолоджується. За деякої температури T рідина із щільністю $\rho_r=1,9\rho_{\text{кр}}$ заповнює половину пробірки. Визначити цю температуру T . Критична температура ефіру $T_{\text{кр}}=467 \text{ К}$.
27. Дві однакові сполучені посудини наповнені газом за нормальних умов. Знайти об'єм V кожної посудини, необхідний для того, щоб ймовірність стану, за якого тиск в посудинах ізотермічно змінюється на $0,1\%$, була у e^{100} разів менша за ймовірність початкового стану.
28. Водень при температурі $T=300 \text{ К}$ та тиску $P=10^{-6} \text{ атм.}$ витікає у вакуум з тонкостінної посудини через отвір площиною $0,1 \text{ мм}^2$. Тиск водню в посудині сталий. Визначити флуктуації кількості атомів, що виходять з посудини протягом 10^{-3} с .



29. Термодинамічна система являє собою газ із $N=10^{23}$ незалежних двохатомних молекул, кожна з яких може знаходитись в одному із станів з енергіями ε_1 та ε_2 . Температура системи $kT=\varepsilon_2-\varepsilon_1$. Знайти флуктуацію кількості часток на кожному енергетичному рівні. Обчислити теплоємність системи при сталому об'ємі.
30. Знайти, на скільки збільшується теплоємність газу, що обертається, в порівнянні з нерухомим газом. Аргон з молекулярною масою $\mu = 40$ заповнює циліндр радіуса $a = 2,5$ см та обертається навколо осі циліндра з кутовою швидкістю $\omega = 2 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$, температура $T = 300$ К.
31. Герметичний закритий циліндр висотою $H=1$ м знаходиться у вертикальному положенні на певній висоті над поверхнею Землі. Циліндр кидають таким чином, щоб його вісь зберігала вертикальне положення. В циліндрі знаходиться 1 моль кисню при температурі $T=293$ К та атмосферному тиску. Вважаючи, що в польоті встигає встановитись термодинамічна рівновага, знайти зміну ентропії газу к цьому моменту. Тертям повітря та зміною температури з висотою знехтувати. Стінки циліндра теплопровідні.
32. Оцінити відстань, на яку розповсюджується звук з частотою 10^3 Гц в спокійній атмосфері за нормальних умов. Вважати, що згасання звуку обумовлене тільки теплопровідністю.
33. Знайти різницю молярних ентропій для молекулярного кисню за умов ефекту Кнудсена всередині стакану з пористими стінками та зовні стакану. Температура всередині стакану дорівнює $T_1 = 350$ К, зовні стакану $T_2 = 300$ К.
34. Колба термоса об'ємом $V = 1 \text{ дм}^3$, що відкачана до тиску $P = 1$ Па, знаходиться при температурі $T_0 = 300$ К. За який час чай в такому термосі охолоне від 90°C до 70°C ? Площа поверхні колби $S = 400 \text{ см}^2$. Втрати тепла через корок не враховувати.
35. Для виміру абсолютного тиску в межах до $p=4 \cdot 10^{-3}$ мм.рт.ст. використовують абсолютний манометр Кнудсена – дві паралельні пластини, що нагріті до різних температур. Нижня, нерухома пластина, має температуру T_1 , що на $10\text{-}40^\circ\text{C}$ більше за температуру T_2 верхньої, рухомої, пластини і температури газу. За яким принципом працює такий прилад? Оцініть відстань між пластинами та знайдіть силу яка діє на верхню пластину, якщо її площа $S=10 \text{ см}^2$.
36. Молекулу O_2 можна розглядати як гармонічний осцилятор з коефіцієнтом жорсткості κ . Знайти середню амплітуду коливань молекули при температурі $T=1000$ К, якщо частота коливань дорівнює $\omega=10^{14}$ 1/с, маса атома кисню $2,7 \cdot 10^{-26}$ кг.
37. Вакуумний діод складається із тонкої нитки-катода та коаксiального циліндра-анода радіусом $R=1$ см. Катод емітує електрони при температурі $T=1450$ К. Між анодом та катодом прикладена запираюча напругу $U=0,3$ В. Знайти густину електронів поблизу анода, якщо густина електронів біля катода 10^{10} ел/см³. Стала Больцмана $k_B=1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К, заряд електрона $e=1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл.
38. При вирощуванні плівок GaAs використовують метод атомарної епітаксії, при якому Ga випаровується при температурі 1250 К та осідає на пласку підкладку. Визначити швидкість росту плівки (г/см²), якщо концентрація молекул Ga $2,6 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$. Молярна маса галію 70 г/моль.
39. Дві посудини однакового об'єму V з'єднані довгою тонкою трубкою довжини L та перерізом S , ($LS \ll V$). На початку одна з посудин наповнена сумішшю газів CO та N₂ із парціальним тиском P та $P-P_0$, відповідно. Друга посудина наповнена N₂ при тиску P . Коефіцієнт дифузії газів дорівнює D . Визначити залежність парціального тиску CO в першій посудині від часу.
40. Один моль аргону знаходиться в горизонтальній теплоізоляційній трубці довжиною L та перерізом S . Один кінець труби постійно підігрівають і таким чином утримують при температурі T_1 , а інший кінець знаходиться при кімнатній температурі T_2 . Знайти потужність нагрівача, необхідну для підтримання постійного градієнта температур. Вважати, що молярна теплоємність газу C_V та довжина вільного пробігу λ не залежать від температури, теплоємністю стінок труби знехтувати.
41. Всередині посудини, утвореної двома концентричними сферами радіусами 3 та 6 см, підтримують сталу концентрацію кисню $1 \cdot 10^{23}$ біля поверхні внутрішньої сфери та $8 \cdot 10^{23}$ біля поверхні зовнішньої. Кисень знаходиться при кімнатній температурі. Знайти розподіл густини часток газу залежно від відстані від центру сфер та кількість часток що проходить в одиницю часу через одиницю поверхні на відстані r . Газокінетичний діаметр молекул кисню $2 \cdot 10^{-8}$ см.

