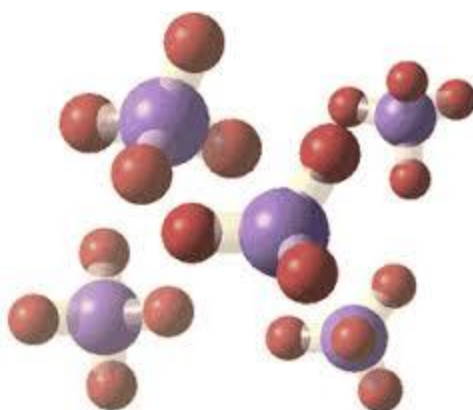


**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

КАФЕДРА ВИЩОЇ МАТЕМАТИКИ І ФІЗИКИ

*Методичні рекомендації
щодо організації практичних занять з фізики, частина 2.
Молекулярна фізика і термодинаміка
для студентів денної та заочної форм навчання
технічних спеціальностей*



Покровськ, 2019

УДК 378.147

Методичні рекомендації з курсу загальної фізики для студентів технічних спеціальностей всіх форм навчання. Фізика. Частина 2. *Молекулярна фізика і термодинаміка* для студентів денної та заочної форм навчання технічних спеціальностей /Л.Г.Сергієнко – ДонНТУ, 2019р.– 41 с.

Мета вказівок – надати методичну та організаційну допомогу студентам для організації та реалізації самостійної роботи під час підготовки до практичних занять з курсу фізики.

Вказівки містять технологічні планкарти лекційних та практичних занять із вказівкою літератури для самостійної роботи.

Укладач: Сергієнко Л. Г., к.п.н., доцент кафедри ВМФ

Рецензент: Новікова Ю.В., к.ф.-м.н., доц.. кафедри ВМФ

Відповідальний за випуск: Медведєва М. І., зав. кафедрою ВМФ

Затверджено навчально-методичним відділом ДонНТУ,
протокол № 11 від 25.06. 2019 р.

Розглянуто на засіданні кафедри математики і фізики,
протокол № 5 від 27.05.2019 р.

ЗМІСТ

Вступ	4
1. Технологічна планкарта практичних занять	5
2. Практичне заняття 1. «Основи молекулярної фізики. Властивості газів. Абсолютна шкала температур. Модель ідеального газу та його термодинамічні параметри. Тиск газу»	6
3. Практичне заняття 2. «Експериментальні газові закони ізопроцесів: ізотермічний, ізобарний, ізохорний, адіабатний. Основне рівняння МКТІГ- рівняння Клаузіуса. Явища перенесення. Капілярні явища».....	9
4. Практичне заняття 3. «Реальні гази. Рівняння Ван-дер-Ваальса. Ізотерми Ван-дер-Ваальса. Фазові переходи. Критичний стан».....	14
5. Практичне заняття 4. Основи термодинаміки. Внутрішня енергія тіл. Способи зміни внутрішньої енергії. Перший закон термодинаміки та його застосування до ізопроцесів.....	18
6. Практичне заняття 5. Робота та енергія термодинамічних процесів і циклів. Кількість Теплоти. Адіабатний процес. Рівняння Пуассона.. ..	21
7. Практичне заняття 6. Зворотні і незворотні теплові процеси. Кругові процеси (цикли). Цикл Карно. Теплові двигуни. Холодильні машини. ККД теплових двигунів. Друге начало термодинаміки та його статистичний зміст. Ентропія ідеального газу.....	25
Екзаменаційні питання з дисципліни.....	34
Список рекомендованої літератури	35
Додаток А	36
Додаток Б.....	37
Додаток В.....	38
Додаток Г.....	39
Додаток Д.....	40
Додаток Е.....	41

ВСТУП

Вивчення курсу загальної фізики є одним з найважливіших елементів підготовки висококваліфікованого інженера, воно сприяє розвитку логічного мислення, підвищенню загального наукового рівня і виробленню навичок дослідження прикладних питань.

Мета даних методичних рекомендацій – допомогти студентам першого та другого курсів навчання у самостійній організації та реалізації їхньої роботи з вивчення курсу загальної фізики. Рекомендації містять поради щодо організації практичних занять з теми: Молекулярна фізика і термодинаміка.

По всіх темах практичних занять приводяться номери задач, які варто вирішити для успішного засвоєння курсу. Частина цих задач вирішується на практичних заняттях в аудиторії (приклади їхнього рішення приводяться в даних рекомендаціях), а частина - складає завдання студенту для самостійного рішення.

Контрольні та індивідуальні завдання виконуються після вивчення студентами відповідних розділів курсу фізики з урахуванням наступних вимог:

Студент виконує завдання тільки відповідно до свого варіанту.

1. Контрольні роботи виконуються в окремих зошитах або на аркушах формату А-4, залишаючи поля для зауважень рецензента.
2. На титульному листі обов'язково вказується предмет (фізика), номер контрольної роботи, прізвище та ім'я по-батькові, номер варіанту, дату виконання роботи.
3. Перш за все, необхідно уважно прочитати умову завдання, записати його в повній і стислій формах.
4. Вказати основні закони та формули, на яких базується рішення цієї задачі, дати пояснення цих законів.
5. Навести креслення, яке пояснює зміст задачі (якщо це необхідно та можливо).
6. Супроводити рішення задачі короткими, але вичерпними поясненнями.
7. Завдання з невеликою кількістю розрахунків слід виконувати в загальному вигляді, а потім у одержані формули підставити чисельні значення величин. Зробити їх перевірку.
8. Для завдань з великою кількістю розрахунків необхідно спочатку показати загальний засіб рішення, скласти відповідні рівняння, які зручніше потім виконувати з підставленими численними значеннями.
9. Результати, які одержані під час виконання завдань, слід перевіряти та обґрунтовувати. Оцінити правдоподібність одержаних численних результатів, зробити висновки.
10. Якщо під час виконання завдань, або при вивченні навчальної літератури з фізики та спеціальних дисциплін виникають труднощі, необхідно

звернутися за консультацією до викладача, вказуючи при цьому на особисті міркування щодо рішення цієї задачі.

1. Технологічна планкарта практичних занять

№	Найменування тем практичних занять	Література	Завдання для самостійного вивчення матеріалу
1	Практичне заняття : Основи молекулярної фізики. Статистичний і термодинамічний методи дослідження. Властивості газів. Абсолютна шкала температур. Модель ідеального газу і його термодинамічні параметри.. Тиск газу. Середня енергія молекул. Ступені свободи. Явища перенесення. Капілярні явища.	(1) §11-13, 29. (3) § Ч.2 Розділ 1 (4) § 41	Рівновага стану і термодинамічні процеси.
2	Практичне заняття: ізопроцеси - ізотермічний, ізобарний, ізохорний. Експериментальні газові закони: Бойля-Маріотта, Гей-Люссака, Шарля, Клапейрона, Менделєєва-Клапейрона. Основне рівняння МКТГ- рівняння Клаузіуса. Адіабатний процес. Рівняння Пуассона.	(1) §14-20. (4) § 42-43	Закони ідеальних газів та їх графічна інтерпретація
3	Практичне заняття: Реальні гази. Рівняння Ван-дер-Ваальса. Фазові переходи. Критичний стан. Внутрішня енергія реального газу.	(3) § Ч.2 Розділи 5,6 (4) Глава10	Внутрішня енергія реального газу. Фізична кінетика

3	Практичне заняття: Основи термодинаміки. Внутрішня енергія тіл. Способи зміни внутрішньої енергії. І закон термодинаміки та його застосування до ізопроцесів.	(1) §21-22 (4) Глава 9	Внутрішня енергія ідеальних газів
5	Практичне заняття: Робота термодинамічних процесів. Кількість теплоти. Теплові двигуни. Холодильні машини. ККД теплових двигунів.	(1) §23-25, 27 (3) Ч.2 Розділи 2,3	Ступені свободи
6	Практичне заняття: Розподіл Максвелла. Розподіл Больцмана. Внутрішня енергія та шляхи її зміни. Зворотні і незворотні теплові процеси. Кругові процеси і цикли. Цикл Карно. Друге начало термодинаміки та його статистичний зміст. Ентропія ідеального газу.	(1) § 17-26, 28,29 (3) § Ч.2 Розділ 4	Статистичне тлумачення II начала ТД.

Практичне заняття 1: “Властивості газів. Абсолютна шкала температур. Модель ідеального газу. Тиск газу”.

Мета: Поглиблення уявлень студентів про властивості газів, модель ідеального газу. уточнити поняття температури – як величини, що характеризує стан теплової рівноваги та є мірою середньої кінетичної енергії молекул, пояснити з точки зору молекулярно-кінетичної теорії (МКТ) визначення тиску для газів; розвивати уяву і логічне мислення студентів; виховувати необхідність в знаннях. Актуалізація опорних знань.

Завдання: Засвоєння нових знань, встановлення залежності між трьома основними макропараметрами газу.

Основні теоретичні уявлення

Молекулярна фізика вивчає будівлю і властивості речовини, виходячи з молекулярно-кінетичної теорії (МКТ).

Стан газу характеризується сукупністю трьох основних фізичних величин або термодинамічних параметрів: об'ємом газу V , тиском P і температурою T . Стан газу, при якому ці параметри залишаються постійними

вважають рівноважним станом. У цьому стані параметри газу пов'язані між собою рівнянням стану. Найпростіший вид рівняння стану має для ідеального газу. Ідеальним газом називають газ, молекули якого не мають розмірів (матеріальні точки) і взаємодіють один з одним лише при абсолютно пружних зіткненнях (відсутнє міжмолекулярне тяжіння і відштовхування). Реальні гази тим точніше підкоряються законам ідеальних газів, чим менше розміри їх молекул (тобто газ одноатомний), і чим більше він розріджений.

Рівняння стану ідеального газу (рівняння Клапейрона-Менделєєва):

$$pV = \frac{m}{\mu}RT \quad \text{чи} \quad pV = \nu RT,$$

де m – маса газу; μ – його молярна маса;

R – молярна газова постійна;

$\nu = \frac{m}{\mu}$ – кількість речовини;

T – термодинамічна температура.

Кількість речовини можна також визначити: $\nu = \frac{N}{N_A}$,

де N – число молекул (атомів), що складають систему;

N_A – число Авогадро ($N_A = 6,02 \cdot 10^{25}$ моль⁻¹)

Питання для самоконтролю

1. Чи мають гази власний об'єм? Чи мають гази форму?
2. Чи утворюють гази струмені? Течуть?
3. Чи можна гази стиснути?
4. Як розміщені молекули в газах? Як вони рухаються?
5. Що можна сказати про взаємодію молекул у газах?
6. Поняття ідеального газу як фізичної ідеалізації.
7. Температура як термодинамічний параметр ідеального газу.
8. Що таке атом? Що таке молекула? Наведіть основні положення МКТ.
9. Який газ називається ідеальним? Які властивості молекул ідеального газу?
10. Поясніть тиск газу з погляду молекулярно-кінетичної теорії.

Приклади рішення задач

Задача 1. Визначити ємність балону, в якому знаходиться газ, якщо концентрація молекул $n = 1,25 \cdot 10^{26}$ м⁻³, а загальна їх кількість $N = 2,5 \cdot 10^{23}$.

Аналіз і рішення задачі:

Згідно визначенню, концентрація молекул газу: $n = \frac{N}{V}$.

Звідки, ємність балону: $V = \frac{N}{n}$. (1)

Підставляючи в формулу (1) числові значення фізичних величин, визначимо:

$$V = 2,5 \cdot 10^{23} / 1,25 \cdot 10^{26} \text{ м} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 = 2 \text{ л.}$$

Задача 2. В балоні ємністю 5л знаходиться азот масою 17,5г. Визначити концентрацію молекул азоту в посудині.

Аналіз и рішення задачі

Концентрація молекул газу: $n = \frac{N}{V}$.

Кількість молей газу: $\nu = \frac{m}{\mu}$,

де μ – молярна маса газу.

Кількість молекул газу: $N = \nu \cdot N_A$,

де N_A – число Авогадра, $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ мол}^{-1}$.

Враховуючи вище згадане, концентрація молекул азоту дорівнювати:

$$N = \frac{m}{\mu} \cdot \frac{N_A}{V}.$$

Молярна маса азоту (N_2): $\mu = 28 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$.

$$\text{Таким чином: } n = \frac{0,0175}{0,028} \cdot \frac{6,02 \cdot 10^{23}}{0,005} = 7,5 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}.$$

Задача 3. Визначте концентрацію молекул газу, який в посудині ємністю 4л знаходиться під тиском 0,5мкПа при температурі 27° С?

Дано:

$$V = 4 \text{ л} = 0,004 \text{ м}^3.$$

$$p = 0,5 \text{ мкПа} = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ Па}$$

$$t = 27^\circ \text{ С} = 300 \text{ К}$$

$n = ?$

Аналіз і рішення задачі:

Зв'язок тиску газу з концентрацією має вигляд: $p = nkT$, (1)

де k – стала Больцмана, $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$.

З рівняння (1) визначимо концентрацію газу: $n = \frac{p}{kT}$.

$$\text{Таким чином: } n = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ Па} / (1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300) = 1,21 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-3}.$$

Завдання для самостійного опрацювання

2.00. В ємності $V = 0,5 \text{ л}$ міститься газ за нормальних умов. Визначити число N молекул газу, що знаходяться в колбі.

2.01. В балоні ємністю $V = 5 \text{ л}$ міститься кисень масою $m = 20 \text{ г}$. Визначити концентрацію n молекул у балоні.

2.02. Визначити кількість речовини ν водню, що знаходиться в балоні об'ємом $V = 3 \text{ л}$, якщо концентрація молекул газу $n = 2 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$.

2.03. Визначити кількість речовини ν та число N молекул азоту масою $m = 0,2 \text{ кг}$.

2.04. Який об'єм за нормальних умов має суміш 4 кг кисню та 2 кг азоту?

2.05. Визначити: 1) число N молекул води, що займають при температурі 4°С

об'єм $V = 1 \text{ мм}^3$; 2) масу цих молекули води.

2.06. Одна третина молекул азоту масою $m = 10 \text{ г}$ розпалась на атоми. Визначити повне число N частинок, що міститься в такому газі.

2.07. В ємності об'ємом $V = 4 \text{ л}$ знаходиться водень масою $m = 1 \text{ г}$. Яке число молекул N містить одиниця об'єму?

2.08. В ємності знаходиться суміш кисню та водню. Маса суміші $m = 3,6 \text{ г}$. Маса кисню $0,6 \text{ г}$. Визначити кількість речовини ν суміші, а також ν_1 , та ν_2 , кожного газу окремо.

2.09. В балоні знаходиться газ при температурі $t_1^0 = 100^\circ\text{C}$. До якої температури t_2^0 потрібно нагріти газ, щоб його тиск збільшився у 2 рази?

2.10. Кисень масою 12 г знаходиться в об'ємі 2 л , причому відомо, що 40% молекул дисоціювало на атоми. Знайти концентрацію n частинок в одиниці об'єму, а також кількість речовини ν_1 і ν_2 , кожної компоненти.

Література: [1, 3, 5 - 10].

Практичне заняття 2: “ Експериментальні газові закони ізопроцесів: ізотермічний, ізобарний, ізохорний, адіабатний. Основне рівняння МКТІГ – рівняння Клаузіуса. Явища перенесення. Капілярні явища ”.

Мета: оволодіти фізичними принципами молекулярної фізики та методикою формування вивчення основних понять курсу.

Завдання: науково-методичний аналіз наслідків основного рівняння МКТ газів.

Основні теоретичні уявлення

Експериментальні газові закони для ізопроцесів:

1) закон Бойля-Маріотта (ізотермічний процес: $T = \text{const}$; $m = \text{const}$)

$$pV = \text{const};$$

2) закон Гей-Люссака (ізобарний процес: $p = \text{const}$; $m = \text{const}$)

$$\frac{V}{T} = \text{const};$$

3) закон Шарля (ізохорний процес: $V = \text{const}$; $m = \text{const}$)

$$\frac{P}{T} = \text{const}$$

4) рівняння Пуассона (адіабатний процес): $PV^\gamma = \text{const}$,

де γ - коефіцієнт Пуассона.

5) об'єднаний газовий закон (рівняння Клапейрона, $m = \text{const}$)

$$\frac{pV}{T} = \text{const};$$

6) закон Дальтона, що визначає тиск суміші газів.

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_n,$$

де p_i - парціальні тиски компонентів суміші.

7) основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії ідеальних газів (рівняння Клаузіуса):

$$p = \frac{2}{3} n \langle E \rangle ,$$

де $\langle E_n \rangle$ - середня кінетична енергія поступального руху молекул;

n - концентрація молекул.

$$\langle E_k \rangle = \frac{3}{2} kT ,$$

де k – постійна Больцмана.

Число молекул в одиниці об'єму (концентрація молекул): $n = \frac{P}{kT}$, $P = nkT$.

Питання для самоконтролю

1. Який процес називається ізотермічним, ізобаричним, ізохоричним? Яким законам вони підкоряються?
2. Що являє собою універсальна газова постійна R в рівнянні Клапейрона?
3. Чим відрізняється від нього рівняння Клапейрона-Менделєєва?
4. Виведіть основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії ідеальних газів.
5. Від чого залежить середня кінетична енергія молекул ідеального газу?
6. Коли на нагрівання газу витрачається більше теплоти – при ізобаричному чи ізохоричному процесі? Чому?
7. На що витрачається теплота, що надається газу, при ізотермічному розширенні?
8. Чим відрізняється адіабатичний процес від інших?

Приклади рішення задач

P.S. Рівняння Менделєєва-Клапейрона застосовують тоді, коли:

1. дано тільки один стан газу і задана маса газу (або замість маси використовують кількість речовини або щільність газу).
2. маса газу не задана, але вона змінюється, тобто здійснюється витік газу або накачування.

При вирішенні завдань на застосування рівняння стану ідеального газу треба пам'ятати:

1. якщо дана суміш газів, то рівняння Менделєєва-Клапейрона записують для кожного компонента окремо. Зв'язок між парціальними тисками газів, що входять в суміш і результуючим тиском суміші, встановлюється законом Дальтона.
2. якщо газ змінює свої термодинамічні параметри або масу, рівняння Менделєєва-Клапейрона записують для кожного стану газу окремо і отриману систему рівнянь вирішують щодо шуканої величини.

- Необхідно користуватися тільки абсолютною температурою і відразу ж переводити значення температури за шкалою Цельсія в значення за шкалою Кельвіна.
- У завданнях, де розглядається рух посудини з газом (бульбашки повітря, повітряної кулі) до рівняння газового стану додають рівняння механіки.
- якщо між газами відбувається реакція, то треба скласти рівняння реакції і визначити продукти реакції.

Задача 1. Визначити різницю мас повітря, що знаходиться в кімнаті обсягом 30 м^3 , узимку і влітку, якщо влітку температура в кімнаті $+30^\circ$, а узимку - 20° С. Тиск вважати нормальним.

Аналіз і рішення задачі:

Скористаємося рівнянням Менделєєва-Клапейрона, тому що необхідно обчислити масу газу. Запишемо рівняння для двох положень:

$$pV = \frac{m_1}{\mu} RT_1 \quad (1)$$

$$pV = \frac{m_2}{\mu} RT_2 \quad (2),$$

де m_1 – маса повітря при температурі T_1 (влітку);
 m_2 – маса повітря при температурі T_2 (узимку).

З рівняння (1) визначимо масу газу m_1 :

$$m_1 = \frac{pV\mu}{RT_1} \quad (3);$$

з рівняння (2) визначимо масу газу m_2 :

$$m_2 = \frac{pV\mu}{RT_2} \quad (4).$$

Тоді різниця мас повітря буде дорівнювати:

$$\Delta m = m_2 - m_1 = \frac{pV\mu}{R} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right).$$

При підстановці числових значень:

$$p_0 = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$T_1 = 30 + 273 = 303 \text{ К}$$

$$T_2 = 20 + 273 = 293 \text{ К}$$

$$\mu = 29 \cdot 10^{-3} = \text{кг/моль}$$

$$R = 8,31 \text{ Дж/моль} \cdot \text{К}$$

$$V = 30 \text{ м}^3, \text{ отримаємо:}$$

$$\Delta m = \frac{1,013 \cdot 10^5 \cdot 30 \cdot 0,029}{8,31} \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{293} \right) \approx 1 \text{ кг}$$

Задача 2. У посудині місткістю $V = 5\text{ л}$ знаходиться кисень масою $m = 15\text{ г}$. Визначте: 1) концентрацію молекул кисню в посудині; 2) число N молекул газу в посудині.

Дано: $V = 5 \text{ л} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$; $\mu = 32 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$; $m = 15 \text{ г} = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ кг}$.
Знайти: 1) n ; 2) N .

Аналіз і рішення задачі:

Використовуємо рівняння Клапейрона-Менделєєва: $pV = \frac{m}{\mu}RT$ (1)

і рівняння стану ідеального газу: $P = nkT$ (2).

Розділивши (1) на (2), знайдемо шукану концентрацію молекул кисню в посудині: $mR/k\mu V = n$ (3).

Концентрація молекул: $n = N/V$.

Звідки шукане число молекул газу в посудині: $N = nV$.

Відповідь: 1) $n = 5,64 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$; 2) $N = 2,82 \cdot 10^{23}$.

Задача 3. Є дві посудини з газом: один місткістю 3 л, інший 4 л. У першому посудині газ знаходиться під тиском 202 кПа, а в другому 101 кПа. Під яким тиском буде знаходитися газ, якщо ці судини з'єднати між собою? Вважати, що температура в судинах однакова і постійна.

Дано: $V_1 = 3 \text{ л} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$; $V_2 = 4 \text{ л} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$;

$P_1 = 202 \text{ кПа} = 202 \cdot 10^3 \text{ Па}$; $P_2 = 101 \text{ кПа} = 101 \cdot 10^3 \text{ Па}$.

Знайти: P .

Аналіз і рішення задачі:

Згідно закону Дальтона: $P = P_3 + P_4$ (1)

Так як процес ізотермічний, то парціальний тиск газу в кожній посудині можна знайти за законом Бойля-Маріотта:

$$P_1 V_1 = P_3 V, P_2 V_2 = P_4 V, \quad (2)$$

де $V = V_1 + V_2$.

Тоді парціальний тиск газу в кожній із посудин після їх з'єднання:

$$P_3 = P_1 V_1 / V; P_4 = P_2 V_2 / V \quad (3)$$

Підставляємо вирази (3) в (1): $P = \frac{P_1 V_1}{V} + \frac{P_2 V_2}{V} = \frac{P_1 V_1 + P_2 V_2}{V}$

Відповідь: $P = 141 \text{ Па}$

Задача 4. Капілярну трубку з дуже тонкими стінками прикріпили до коромисла ваги, після чого терези були врівноважені. До нижнього кінця капіляра торкнулись поверхнею води, і при цьому, для врівноваження капіляра, довелося додати вантаж 1,32 мН. Визначити радіус капіляра.

Дано:

$$p = 1,32 \text{ мН} = 1,32 \cdot 10^{-3} \text{ Н}$$

$$\delta = 0,073 \text{ Н/м}$$

$r = ?$

Аналіз і рішення задачі:

Сили поверхневого натягу діють на внутрішню та зовнішню поверхні трубки. Враховуючи невелику товщину стінок трубки, можна вважати

радіуси кривини поверхонь рідини біля стінок капіляра однаковими за величиною всередині та ззовні трубки.

Отже, однаковими можна вважати і сили, що діють на внутрішню та зовнішню поверхні трубки.

Сила, що діє на внутрішню поверхню, дорівнює вазі води, яка піднялась в капілярі під дією сил поверхневого натягу, а зміна ваги капіляра дорівнює подвійній вазі цієї води, тобто:

$$F = P/2.$$

Коефіцієнт поверхневого натягу води:

$$\delta = F/l,$$

де $l = 2\pi r$. Звідси:

$$\delta = F/l = p/2 \times 2\pi r = p/4\pi r$$

$$\text{отже, } r = p/4\pi\delta = 1,32 \times 10^{-3} / 12,56 \times 0,073 = 1,47 \text{ мм}$$

Задача 5. Знайти додатковий тиск в мильній бульбашці діаметром $d = 10$ мм. Визначити також роботу A , яку треба виконати, щоб надути цю бульбашку.

Дано:

$$d = 10 \text{ мм} = 0,010 \text{ м}$$

$$\sigma = 40 \text{ мН/м} = 0,04 \text{ Н/м}$$

 p - ? A - ?

Аналіз і рішення задачі

Плівка мильної бульбашки має дві сферичні поверхні - зовнішню та внутрішню. Обидві поверхні тиснуть на повітря, що знаходиться всередині бульбашки. Оскільки товщина плівки дуже мала, то діаметри обох поверхонь практично однакові. Тому додатковий тиск дорівнює: $p = 4\sigma/r$, де r - радіус бульбашки.

Оскільки: $r = d/2$, то $p = 8\sigma/d$.

Підставивши в цю формулу значення σ та d , отримаємо:

$$p = \frac{8 \cdot 0,040}{0,01} = 3,2 \text{ Па}$$

Тоді робота: $A = \sigma S = 2\pi r d = 2 \cdot 3,14 \cdot (0,01)^2 \cdot 0,040 = 2,5 \text{ мДж}$.

Завдання для самостійного опрацювання

2.11. При нагріванні ідеального газу на $\Delta T = 1 \text{ К}$ при постійному тиску об'єм його збільшився на $1/350$ початкового об'єму. Знайти початкову температуру T_0 газу.

2.12. Маса $m = 12 \text{ г}$ газу займає об'єм $V = 4 \text{ л}$ при температурі $t_1 = 7^\circ \text{C}$. Після нагрівання газу при постійному тиску його густина стала $\rho = 0,6 \text{ кг/м}^3$. До якої температури нагріли газ?

2.13. В посудині об'ємом $V = 2 \text{ л}$ знаходиться маса $m_1 = 6 \text{ г}$ CO_2 , та маса $m_2 = 2 \text{ г}$ N_2O при температурі $t^\circ = 127^\circ \text{C}$. Визначити тиск суміші в посудині.

2.14. В балонах об'ємом $V_1 = 20 \text{ л}$ і $V_2 = 44 \text{ л}$ знаходиться газ. Тиск у першому

балоні $p_1 = 2,4$ МПа, у другому – $p_2 = 1,6$ МПа. Визначити загальний тиск p та парціальні тиски після з'єднання балонів, якщо температура не змінилась.

2.15. В балоні об'ємом $V = 20$ л знаходиться CO_2 масою $m = 500$ г під тиском $p = 1,3$ МПа. Визначити температуру газу.

2.16. Газ при температурі $T = 309\text{K}$ і тиску $p = 0,7$ МПа має густину $\rho = 12\text{кг/м}^3$. Визначити відносну молярну масу газу M_r .

2.17. В балоні об'ємом $V = 25$ л знаходиться водень при температурі $T = 290\text{K}$. Після того як частину водню використали, тиск в балоні знизився на $\Delta p = 0,4$ МПа. Визначити масу m витраченого водню.

2.18. В циліндрі під поршнем знаходиться повітря під тиском $p_2 = 0,2$ МПа при температурі $t_1^0 = 27^\circ\text{C}$. Який вантаж треба покласти на поршень після нагрівання повітря до температури $t_2^0 = 50^\circ\text{C}$, щоб об'єм повітря в циліндрі не змінився? Площа поршня $S = 30\text{ см}^2$.

2.19. Яка температура T газу, який знаходиться під тиском $p = 0,5$ МПа, якщо в ємності об'ємом $V = 15$ л знаходиться $N = 1,8 \cdot 10^{24}$ молекул? Газ вважати ідеальним.

Література [1, 3 -10].

Практичне заняття 3. «Реальні гази. Рівняння Ван-дер-Ваальса. Ізотерми Ван-дер-Ваальса. Фазові переходи, Критичний стан. Внутрішня енергія реальних газів»

Мета: вивчити поняття реальних газів та уточнити причини їхньої відмінності від ідеальних.

Завдання: формування знань, вмінь та навичок з теми: реальні гази.

Основні теоретичні уявлення

Модель ідеального газу часто використовується при вивченні реальних газів. Справа в тому, що деякі гази в близьких до нормальних умов наближаються за властивостями до ідеальних газів. Крім того, практично для будь-якого реального газу можна створити такі умови, при яких він поводитиметься як ідеальний. Звичайно це досягається за рахунок низьких тисків і високих температур. Бажання привести будь-який реальний газ до ідеального ґрунтується на тому, що для ідеальних газів установлений цілий ряд законів, що описують їхню поведінку (закони Бойля—Маріотта, Гей-Люссака, Авогадро, Дальтона).

Проте, існують процеси, умови протікання яких не дозволяють привести реальний газ до ідеального. Це трапляється в промислових виробництвах, наукових дослідженнях і т. ін. Тому для опису стану реальних газів був установлений ряд закономірностей, які дозволяють вивчати їхню поведінку, не змінюючи умов проведення процесу.

Реальний газ – це газ, в якому враховуються обсяг (розміри) і сили взаємодії молекул. З огляду на власний обсяг молекул і сили

міжмолекулярної взаємодії, голландський фізик Ян-Дерік Ван-дер-Ваальса ввівши поправки в рівняння Менделєєва-Клайперона, вивів рівняння стану реального газу.

Рівняння стану для 1 моля ідеального газу має вигляд: $pV = RT$. Відповідно до цієї формули обсяг газу при стисненні може стати рівним нулю. У разі реальних газів частина простору зайнята самими молекулами. Тому обсяг, який обіймає газ, повинен бути зменшений на величину b , де b - обсяг, займаний самими молекулами, тобто $(V-b)$. Таким чином, b - постійна величина, що враховує обсяги (розміри) молекул. У реальних газах є сили взаємного тяжіння молекул, які діють додатково до сил зовнішнього тиску і як би стискають газ. Внаслідок цього виникає додатковий внутрішній тиск p_i , тобто, $(p + p_i)$, де a - постійна величина, що враховує сили міжмолекулярного тяжіння. Тоді, ввівши поправки на V і p , отримаємо рівняння стану реального газу - рівняння Ван-дер-Ваальса для 1 моля газу:

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

Величини a і b для різних газів різні і їх значення наводяться в довідкових таблицях. Для будь-якої маси газу рівняння Ван-дер-Ваальса має вигляд:

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

Для дослідження поведінки реального газу розглянемо ізоТЕРМИ Ван-дер-Ваальса - криві залежності тиску p від обсягу V при заданих температурах T , що визначаються рівняннями Ван-дер-Ваальса для 1 моля газу. Ці криві розглядаються для чотирьох різних температур і мають своєрідний характер (див. рис.1):

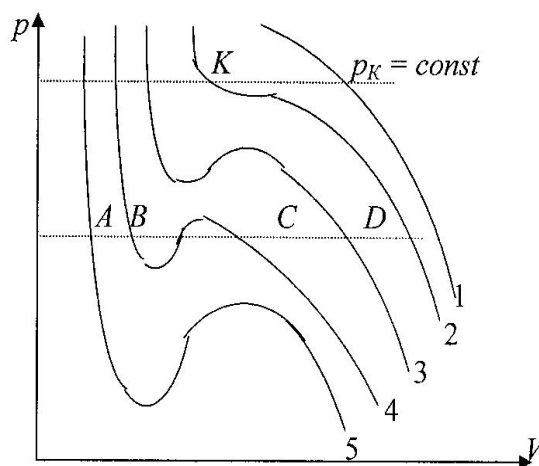


Рис. 1. Ізотерми Ван-дер-Ваальса

Задаючи різні температури $T_1 > T_2 > T_3 > T_4 > T_5$, отримаємо сімейство ізоTERM Ван-дер-Ваальса. При високих температурах ізоТЕРМИ реального газу відрізняється від ізоТЕРМ ідеального газу тільки деяким спотворенням форми.

Ізобара AD перетинає ізоТЕРМУ в одній точці. Отже, кожному значенню тиску і температури відповідає єдине значення обсягу, тобто, невисоким температур відповідають ізоТЕРМИ 2, 3, 4, на яких є вигини.

Ізобара AD перетинає ізоТЕРМУ 4 в трьох точках А, В, С. Це означає, що речовина одночасно перебуває в трьох фазових станах. Перехід від ізоТЕРМИ 5 до ізоТЕРМ 4,3,2,1, відповідній підвищенню температури, призводить до того, що вигини на ізоТЕРМАХ згладжуються. Відстань між точками А і С зменшується і на ізоТЕРМЕ 2 зливаються в одну точку К.

Тут $P_k = \text{const}$ є дотичною до ізоТЕРМИ. Ця ізоТЕРМА називається критичною, відповідна температура T_k - критичною. Відповідні цій точці V_k і P_k - називаються критичними.

Стан з критичними параметрами (V_k , P_k , T_k) називається критичним станом. Температурам, вище критичних, відповідає тільки газоподібний стан речовини.

Отже, критична температура T_k - це найвища температура, при якій газ може ще бути перетворений в рідину. При критичному стані речовини відмінності у властивостях пара і рідини відсутні. Критичні стани характеризуються безперервним переходом пара в рідину і рідини в пар.

Питання для самоконтролю

1. Вкажіть умови, за яких реальні гази можна вважати ідеальними.
2. Чому для реальних газів необхідно враховувати виправлення на обсяг і тиск у закони, яким підкоряються ідеальні гази?
3. Поясніть сутність реальних газів та їх відміну від ідеальних.
4. Наведіть рівняння та ізоТЕРМИ Ван-дер-Ваальса.
5. Які сили враховує поправка «а» в рівнянні Ван-дер-Ваальса? Яку розмірність та порядок величини має поправка «а» в рівнянні Ван-дер-Ваальса?
6. Які сили враховує поправка «b» в рівнянні Ван-дер-Ваальса? Яку розмірність та порядок величини має поправка «b» в рівнянні Ван-дер-Ваальса?
7. Чим відрізняється критична ізоТЕРМА Ван-дер-Ваальса від інших ізоТЕРМ?
8. В яких змінних прийнято записувати рівняння Ван-дер-Ваальса в зведених формі?
9. Чим відрізняється вираз для внутрішньої енергії реального газу від відповідного виразу у випадку ідеального газу?
10. Чим відрізняється вираз для ентропії реального газу від відповідного виразу у випадку ідеального газу?

Приклади рішення задач

Задача 1. Яку температуру має 2 г азоту, який займає об'єм 820 см³ під тиском 0,2 МПа? Газ розглянути як: 1) ідеальний; 2) реальний.

Дано:

$$m = 2 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$$

$$V = 8,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$$

$$P = 2 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$\mu = 28 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

$$T_1 = ? \quad T_2 = ?$$

Аналіз та рішення задачі:

1) Рівняння Менделєєва-Клапейрона для ідеального газу: $PV = \frac{m}{\mu}RT_1$ (1)

Звідки температура в загальному вигляді: $T_1 = \frac{PV\mu}{mR}$;

Після підстановки даних, отримаємо: $T_1 = 280 \text{ К}$.

2) Рівняння Ван-Дер-Ваальса для реального газу:

$$P + \frac{av^2}{V^2}(V - vb) = \nu RT_2, \quad (2)$$

при цьому, кількість газу визначається: $\nu = \frac{m}{\mu}$. (3)

Значення P_k і T_k візьмемо із таблиці (див. додаток):

$$P_k = 3,4 \cdot 10^6 \text{ Па}; \quad T_k = 126 \text{ К}.$$

$$\text{Визначаємо: } a = \frac{27T_k^2 R^2}{64P_k} ; \quad b = \frac{T_k R}{8P_k}$$

$$a = 0,136 \text{ Па} \cdot \text{м}^6 / \text{моль}^2$$

$$b = 3,85 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 / \text{моль};$$

$$\nu = 2/28 = 0,71 \text{ моль}.$$

$$T_2 = [P + \frac{av^2}{V^2}(V - vb)]/(\nu R);$$

$$\text{Таким чином: } T_2 = 280 \text{ К}.$$

P.S. Співпадіння температур T_1 і T_2 в даному випадку пояснюється малою величиною тиску, при якому реальний газ веде себе як ідеальний.

Задача 2. Користуючись даними про критичні значення T_k і P_k для деяких газів (див. таблицю), знайти для них постійні **a** і **b**, які входять у рівняння Ван-дер-Ваальса.

Аналіз та рішення задачі:

Постійні **a** і **b**, які входять до складу рівняння Ван-дер-Ваальса виражаються співвідношеннями:

$$a = \frac{27T_k^2 R^2}{64P_k} ; \quad b = \frac{T_k R}{8P_k}.$$

Користуючись даними про критичні величини T_k і P_k (див. додатки наприкінці даних вказівок), визначте постійні **a** і **b** та заповніть наступну таблицю:

Речовина	Тк, К	Рк, ат	a, Па*м ⁶ /моль ²	b, 10 ⁻⁵ *м ³ /моль
Водяний пар	647	217,5	0,556	3,06
Вуглекислий газ	304	73	0,364	4,26
Кисень	165	50,8	0,136	3,16
Аргон	151	52,9	0,136	3,22
Азот	126	33,5	0,136	3,85
Водень	33,2	12,8	0,0244	2,63
Гелій			0, 00343	2,34

Задача 3. Визначити ефективний діаметр d_{ef} молекули кисню, вважаючи відомими для нього критичні значення T_k і P_k (див. додатки наприкінці даних вказівок).

Аналіз та рішення задачі:

Оскільки стала із рівняння Ван-дер-Ваальса: $b = 4V$, де $V = V_0 \cdot N_A$ – об'єм усіх молекул, а V_0 – об'єм однієї молекули. Таким чином: $b = 4 \cdot V_0 \cdot N_A$.

Крім того: $b = \frac{TkR}{8Pk}$, то $4 \cdot V_0 \cdot N_A = \frac{TkR}{8Pk}$.

$$\text{Звідки: } V_0 = \frac{TkR}{32NAPk} = \frac{4}{3}\pi r^3; \quad d_{\text{ef}} = \sqrt[3]{\frac{3RTk}{16\pi NApk}}$$

$$d_{\text{ef}} = 2,94 \cdot 10^{-10} \text{ м.}$$

Задача 4. 20 кг азоту адіабатичне розширюється до вакууму від $V_1 = 1 \text{ м}^3$ $V_2 = 2 \text{ м}^3$. Визначте зниження (зміну) температури при цьому розширенні, вважаючи відомою для азоту постійну a , яка входить у рівняння Ван-дер-Ваальса.

Аналіз та рішення задачі:

При адіабатичному розширенні газу в порожнечу, робота не здійснюється. Тому внутрішня енергія газу також залишається не змінною. Оскільки внутрішня енергія реального газу дорівнює:

$$U = \frac{i}{2} \nu RT - \frac{a\nu^2}{V}, \text{ то зміна } \Delta U \text{ дорівнюватиме:}$$

$$\Delta U = U_1 - U_2 = \frac{i}{2} \nu R(T_1 - T_2) + \frac{a\nu^2}{V_2} - \frac{a\nu^2}{V_1} = 0 \quad (1)$$

$$\text{Висловимо із (1) } \Delta T = \frac{2\nu a(V_1 - V_2)}{iRV_1V_2};$$

$$\text{Визначимо кількість речовини азоту: } \nu = \frac{m}{\mu}.$$

$$\text{Молярна маса азоту: } \mu = 28 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль.}$$

$$\text{Отже, } \nu = \frac{20}{28 \cdot 10^{-3}} = 710 \text{ моль.}$$

Так як кількість ступенів свободи азоту $i=5$ (газ двоатомний), то зміна температури дорівнюватиме:

$$\Delta T = \frac{2 \cdot 710 \cdot 0,136 \cdot (2-1)}{5 \cdot 8,31 \cdot 1 \cdot 2} = 2,34 \text{ К.}$$

Задача 5. Вуглекислий газ, що містить кількість речовини $\nu = 1$ моль знаходиться в критичному стані. При ізобарному нагріванні газу його обсяг V збільшився в $k = 2$ рази. Визначити зміну ΔT температури газу, якщо його критична температура $T_{кр} = 304$ К.

Аналіз та рішення задачі:

Для вирішення завдання зручно скористатися рівнянням Ван-дер-Ваальса в наведеній формі, тобто, в такій формі, коли тиск P , молярний об'єм V_m і температура T реального газу з відповідними критичними параметрами представлені у вигляді наступних відносин:

$$\pi = P/P_{кр}; \omega = V_m/V_{мкр}; \tau = T/T_{кр}.$$

З цих рівностей отримаємо: $P = \pi \cdot P_{кр}$; $V_m = \omega \cdot V_{мкр}$; $T = \tau \cdot T_{кр}$.

Підставивши сюди вирази $P_{кр}$, $V_{мкр}$, $T_{кр}$ через постійні Ван-дер-Ваальса a й b , знайдемо:

$$\left[\frac{a}{27b^2} + \frac{a}{(3b\omega)^2} \right] [3b\omega - b] = R \frac{8a}{27bR} \cdot \tau.$$

Після скорочення на $a/(27b)$ і в правій частині на R отримаємо:

$$(\pi + 3/\omega^2)(3\omega - 1) = 8\tau/ \quad (1)$$

Це і є рівняння Ван-дер-Ваальса в наведеній формі. Воно не містить ніяких параметрів, що характеризують індивідуальні властивості газу, і тому є універсальним. Тепер відповімо на запитання задачі. Так як тиск залишається постійним ($P = P_{кр}$), то $\pi = 1$; молярний об'єм газу згідно з умовою, збільшився в два рази, тобто $V_m = 2V_{мкр}$, отже, $\omega = 2$.

З рівняння (1) висловимо наведену температуру τ : $\tau = 1/8(\pi + 3/\omega^2)(3\omega - 1)$.

Підставивши сюди значення π і ω та зробивши обчислення, знайдемо, $\tau = 35/32$. Температура T , як зазначалося, пов'язана з приведеною температурою τ і критичної $T_{кр}$ співвідношенням $T = \tau T_{кр}$. Провівши обчислення за цією формулою, одержимо $T = 332$ К.

Задача 6. У циліндрі під поршнем знаходиться хлор масою $m = 20$ г. Визначити зміну ΔU внутрішньої енергії хлору при ізотермічному розширенні його від $V_1 = 200$ см³ до $V_2 = 500$ см³.

Аналіз і рішення задачі:

Внутрішня енергія U реального (Ван-дер-Ваальсово) газу визначається виразом:

$$U = \nu(C_v T - \frac{a}{V_m}). \quad (1)$$

Висловивши в рівності (1) молярний об'єм V_m через обсяг V і кількість речовини ν ($V_m = V/\nu$) та врахувавши, що $\nu = m/\mu$, отримаємо:

$$U = \frac{m}{\mu} (C_v T - \frac{ma}{mV_m}) \quad (2)$$

Зміна ΔU внутрішньої енергії в результаті ізотермічного розширення знайдемо як різницю двох значень внутрішньої енергії при обсягах V_2 і V_1 :

$$\Delta U = U_2 - U_1 = \frac{m2a(V_2 - V_1)}{\mu 2V_1V_2} \quad (3)$$

Врахуємо, що: $m = 0,02$ кг; $\mu = 0,07$ кг/моль; $a = 0,650$ Па*М⁶ / моль².

Підставивши значення величин у формулу (3) і провівши обчислення, отримаємо: $\Delta U = 154$ Дж.

Завдання для самостійного опрацювання

2.20. У балоні місткістю $V = 8$ л знаходиться кисень масою $m = 0,3$ кг при температурі $T = 300$ К. Знайти, яку частину місткості посудини становить власний обсяг молекул газу? Визначити відношення внутрішнього тиску p' до тиску p газу на стінки посудини.

2.21. Вуглекислий газ, що містить кількість речовини $\nu = 1$ моль, знаходиться в критичному стані. При ізобарному нагріванні газу його обсяг V збільшився в $k = 2$ рази. Визначити зміну ΔT температури газу, якщо його критична температура $T_{кр} = 304$ К.

2.22. У циліндрі під поршнем знаходиться хлор масою $m = 20$ г. Визначити зміна ΔU внутрішньої енергії хлору при ізотермічному розширенні його від $V_1 = 200$ см³ до $V_2 = 500$ см³.

2.23. У дуже міцному сталевому балоні міститься вода, яка займає при кімнатній температурі половину обсягу балона. Знайти тиск (в технічних атмосферах) і щільність водяної пари при підвищенні температури до 400^0 С.

2.24. Визначити тиск $m = 280$ г азоту, що знаходиться при температурі 27^0 С в посудині, об'єм якого дорівнює: 1) $V = 1,00$ м³; 2) $V = 0,50$ л.

2.25. Визначити масу кисню в балоні об'ємом $V = 10,0$ л при температурі 27^0 С і тиску: 1) $p_1 = 1,00$ ат; 2) $p_2 = 410$ ат.

2.26. Яку частину обсягу скляної ампули повинен займати рідкий ефір при $t = 20^0$ С, щоб при його нагріванні можна було спостерігати перехід речовини через критичний стан? Для ефіру $m = 0,074$ кг/моль, $r = 714$ кг/м³ при 20^0 С, $t_k = 194^0$ С, $p_k = 35,6$ ат.

2.27. В посудині місткістю $V = 0,3$ л знаходиться вуглекислий газ, що містить кількість речовини $\nu = 1$ моль при температурі $T = 300$ К. Визначити тиск P газу: 1) за рівнянням Менделєєва - Клапейрона; 2) за рівнянням Ван-дер-Ваальса. (Відповідь: $8,31$ МПа, $5,67$ МПа)

2.28. Криптон, що містить кількість речовини $\nu = 1$ моль, знаходиться при температурі $T = 300$ К. Визначити відносну похибку $\varepsilon = \Delta p/p$, яка буде допущена при обчисленні тиску, якщо замість рівняння Ван-дер-Ваальса скористатися рівнянням Менделєєва - Клапейрона. Обчислення виконати для двох значень обсягу: 1) $V = 2$ л; 2) $V = 0,2$ л.

2.29. Тиск P кисню дорівнює 7 МПа, його щільність $\rho = 100$ кг / м³. Знайти температуру T кисню.

2.30. Обчислити постійні коефіцієнти a і b в рівнянні Ван-дер-Ваальса для азоту, якщо відомі критичні температура $T_{кр} = 126$ К і тиск $P_{кр} = 3,39$ МПа.

- 2.31. Критична температура $T_{кр}$ аргону дорівнює 151 К і критичний тиск $P_{кр} = 4,86$ МПа. Визначити за цими даними критичний молярний об'єм V_m кр аргону.
- 2.32. Визначити найбільший обсяг V_{max} який може займати вода, що містить кількість речовини $\nu = 1$ моль.
- 2.33. Визначити щільність ρ водяної пари в критичному стані.
- 2.34. У скільки разів концентрація $n_{кр}$ молекул азоту в критичному стані більше концентрації n_0 молекул при нормальних умовах?
- 2.35. Знайти критичний обсяг $V_{кр}$ речовин: 1) кисню масою $m = 0,5$ г; 2) води масою $m = 1$ г.
- 2.36. Газ, що містить кількість речовини $\nu = 1$ моль, знаходиться при критичній температурі і займає обсяг V , який в $n = 3$ рази перевищує критичний обсяг $V_{кр}$. У скільки разів тиск P газу в цьому стані менше критичного тиску $P_{кр}$?
- 2.37. При якій температурі T знаходиться оксид азоту, якщо його обсяг V і тиск P в $k = 3$ рази перевищують відповідні критичні значення $V_{кр}$ і $P_{кр}$? Критична температура $T_{кр}$ оксиду азоту дорівнює 180 К.
- 2.38. Газ знаходиться в критичному стані. Як і у скільки разів його тиск P буде відрізнятися від критичного $P_{кр}$ при одночасному збільшенні температури T і обсягу V газу в $k = 2$ рази? (Відповідь: збільшується в 2,45 рази)
- 2.39. Кисень, що містить кількість речовини $\nu = 1$ моль, знаходиться при температурі $T = 350$ К. Знайти відносну похибку ε в обчисленні внутрішньої енергії газу, якщо газ розглядати як ідеальний. Розрахунки виконати для двох значень обсягу V : 1) 2 л; 2) 0,2 л.
- 2.40. Знайти внутрішню енергію U вуглекислого газу при нормальному тиску P_0 і температурі $T = 300$ К масою $m = 132$ г в двох випадках, коли газ розглядають: 1) як ідеальний; 2) як реальний.

Література [3 - 10].

Практичне заняття 4. «Основи термодинаміки. Внутрішня енергія тіл. Способи зміни внутрішньої енергії. Перший закон термодинаміки та його застосування до ізопроесів»

Мета: узагальнити, систематизувати, поглибити, формувати знання студентів про внутрішню енергію з точки зору МКТ, формувати фізичне мислення. Усвідомити головне завдання термодинаміки в курсі фізики.

Завдання: розвинути логічне мислення щодо основ термодинаміки. Засвоїти вихідні положення формування основних понять розділу.

Основні теоретичні уявлення

З точки зору МКТ внутрішня енергія складається із суми потенціальної та кінетичної енергії взаємодіючих тіл (частинок, молекул). При цьому вона визначається зміною температури і ємності тіла: $U = \sum E_{ki} + \sum E_{pi}$, де E_{ki} , E_{pi} – кінетична і потенціальна енергія певної молекули.

Внутрішня енергія тіла не є постійною величиною. При підвищенні температури внутрішня енергія тіла збільшується, з пониженням температури внутрішня енергія зменшується.

Внутрішня енергія ідеального газу визначається тільки кінетичною енергією руху молекул, при цьому, потенціальною енергією їхньої взаємодії можна знехтувати.

Зміна внутрішньої енергії ідеального газу дорівнює:

$$\Delta U = i \cdot \nu R \Delta T; \quad \Delta U = \frac{i}{2} \Delta(PV), \text{ де}$$

U — внутрішня енергія газу (або системи), [Дж];

i — число ступенів свободи молекул;

m — маса речовини, [кг];

μ — молярна маса, [кг/моль];

R — універсальна газова постійна, $R = 8,31$ Дж/(моль*К);

T — температура, [К];

P — тиск, [Па];

k — постійна Больцмана, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К);

ν — кількість речовини, [моль];

ΔT — зміна температури;

ΔU — зміна внутрішньої енергії.

Внутрішню енергію тіла можна збільшити, здійснюючи роботу над тілом:

$$\Delta A = F \Delta x = p S \Delta x = p \Delta V$$

де p - тиск газу, S - площа поршня, Δx - переміщення поршня, $\Delta V = S \Delta x$. При розширенні робота, що здійснюється газом, позитивна, при стискуванні - негативна. У загальному випадку при переході з деякого початкового стану (1) в кінцевий стан (2) робота газу виражається формулою (див. рис. 2):

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV.$$

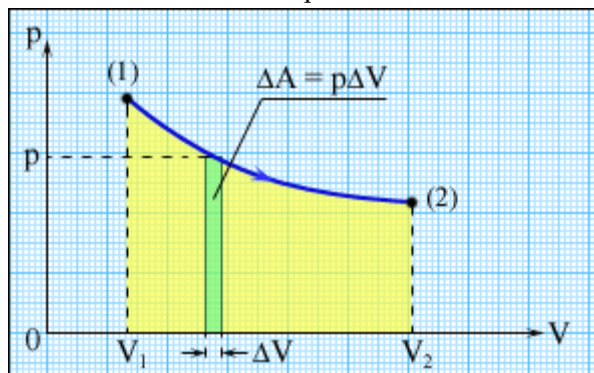


Рис. 2. Графічна інтерпретація здійснення роботи у ТД-системах.

Отже, внутрішня енергія (енергія теплового руху молекул) ідеального газу:

$$U = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} RT; \quad U = \frac{i}{2} PV; \quad U = \frac{i}{2} kTN;$$

$$U = \frac{i}{2} kT \nu N_A; \quad U = \frac{i}{2} \nu RT.$$

Тіло або група тіл, які взаємодіють з навколишнім середовищем, обмінюючись при цьому енергією, називається термодинамічною системою. Існує два способи зміни внутрішньої енергії: робота і теплообмін.

Обчислення зміни внутрішньої енергії під час роботи:

А) Обчислення зміни внутрішньої енергії під час теплообміну:

$\Delta U = Q = cm(t_2^0 - t_1^0) = cm\Delta t^0 = cm(T_1 - T_2)$ – під час нагрівання або охолодження;

Б) $\Delta U = Q = \lambda m$ – під час плавлення або твердіння;

В) $\Delta U = Q = gm$ – під час пароутворення або конденсації.

Перший закон термодинаміки: $Q = \Delta U + A$,

де Q – теплота, надана термодинамічній системі (газу), [Дж];

ΔU – зміна внутрішньої енергії системи, [Дж];

A – робота, виконана системою проти зовнішніх сил, [Дж].

Застосування першого закону термодинаміки до ізопроеесів:

- 1) Ізотермічний процес: $T = \text{const}$; $\Delta T = 0$; $\Delta U = 0$; $Q = A$.
- 2) Ізохорний процес: $V = \text{const}$; $\Delta V = 0$; $A = P\Delta V = 0$; $Q = \Delta U$.
- 3) Ізобарний процес: $P = \text{const}$; $Q = \Delta U + A$.
- 4) Адіабатний процес: $Q = 0$; $A = -\Delta U$.

Питання для самоконтролю

1. Що називається термодинамічною системою?
2. Назвіть основні параметри термодинамічної системи. Які Ви знаєте стани системи?
3. Наведіть молекулярно-кінетичне тлумачення поняття внутрішньої енергії. Від чого залежить внутрішня енергія тіла?
4. Сформулюйте і запишіть 1-й закон термодинаміки. Запишіть його в диференціальній формі.
5. Наведіть застосування 1-го началу термодинаміки до ізопроеесів у газах.
6. Якими способами можна змінити внутрішню енергію тіла?
7. Що означає та як визначається кількість ступенів свободи?
8. Яка різниця між поняттями «кількість теплоти» і «механічна робота»? Які одиниці вимірювання цих величин?
9. Наведіть поняття ентропії та її фізичного змісту.
10. Як пов'язані ентропія і термодинамічна ймовірність стану?

Приклади рішення задач

Задача 1. На скільки збільшується внутрішня енергія 150 г кисню при збільшенні його температури з 20° С до 40° С?

Аналіз та рішення задачі:

Внутрішня енергія газу визначається: $U = \frac{i}{2} \nu RT$, відповідно зміна внутрішньої енергії визначається:

$$\Delta U = \frac{i}{2} \nu R \Delta T = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} R \Delta T,$$

Врахуємо, що $i=5$ (так як кисень є двоатомним газом), $\mu=32 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, $R=8,31$ Дж/(моль*К). Температури потрібно перевести в шкалу Кельвіна. Таким чином:

$$\Delta U = \frac{5}{2} * \frac{0,15}{0,032} 8,31 * (313-293) = 1947,66 \text{ Дж.}$$

Задача 2. Визначте роботу розширення 10 л газу при ізобарному нагріві від 15°C до 27°C і нормальному тиску.

Аналіз та рішення задачі:

Ізобарний процес підкоряється закону Гей-Люссака ($p=\text{const}$; $m=\text{const}$):

$V_1/V_2=T_1/T_2$, звідки можна визначити $V_2=(V_1*T_2)/T_1$.

Таким чином, робота розширення: $A=P(V_2 - V_1) = P[(V_1*T_2)/T_1 - V_1]$.

Врахуємо, що $P=101325$ Па; $T_1= 288$ К; $T_2=300$ К.

$A = 42,56$ Дж.

Задача 3. Вуглекислому газу масою 10 г передана кількість теплоти 1,5 кДж. При цьому газ виконав роботу 500 Дж. На скільки змінилась температура газу?

Аналіз та рішення задачі:

Перший закон термодинаміки має вигляд: $Q = \Delta U + A$. Зміна внутрішньої енергії із першого закону термодинаміки: $\Delta U = Q - A$. (1)

З іншого боку зміна внутрішньої енергії вуглекислого газу, який є

трьохатомним ($i=6$), визначається: $\Delta U = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} R \Delta T$; звідки $\Delta T = 2\mu \Delta U / imR$. (2)

Після підстановки з рівняння (1) ΔU у рівняння (2), отримаємо:

$$\Delta T = 2\mu(Q - A) / imR.$$

З урахуванням числових даних, отримаємо:

$$\Delta T = [(2*0,044*(1500 - 500))/(6*0,010*8,31)] = 176,49 \text{ К}$$

Завдання для самостійного опрацювання

2.41. Обчисліть внутрішню енергію 50 моль двоатомного газу при температурі 17°C .

2.42. На скільки змінюється внутрішня енергія 100 г гелію при збільшенні температури на 15°C ?

2.43. Порівняти внутрішні енергії однакових мас водню та азоту при однакових температурах.

- 2.44.** Як змінюється внутрішня енергія трьохатомного газу під час: 1) ізотермічного стиснення; 2) ізобарного нагрівання; 3) ізохорного охолодження.
- 2.45.** На скільки змінилася внутрішня енергія газу, що здійснив роботу 60 кДж, діставши кількість теплоти 95 кДж?
- 2.46.** Двохатомному газу ($\nu = 3$ молі) передана кількість теплоти 1,5 кДж. При цьому газ здійснив роботу 700 Дж. На скільки змінилася температура газу?
- 2.47.** Водень масою 1,2 кг ізобарно нагріли на 210 К. Необхідно знайти: 1) роботу, що здійснив водень; 2) кількість теплоти, що передано водню; 3) зміну внутрішньої енергії.
- 2.48.** В посудині місткістю $V_1 = 1$ л міститься $m = 10$ г азоту. Визначити зміну ΔT температури азоту, якщо він розширюється в порожнечу до обсягу $V_2 = 10$ л.
- 2.49.** Визначити зміну ΔU внутрішньої енергії неону, що містить кількість речовини $\nu = 1$ моль, при ізотермічному розширенні його обсягу від $V_1 = 1$ л до $V_2 = 2$ л.
- 2.50.** Знайти внутрішню енергію U вуглекислого газу при нормальному тиску P_0 і температурі $T = 300$ К масою $m = 132$ г в двох випадках, коли газ розглядають: 1) як ідеальний; 2) як реальний.
- Література [1, 3 - 10].**

Практичне заняття 5. «Робота та енергія термодинамічних процесів і циклів. Кількість теплоти. Адіабатний процес. Рівняння Пуассона».

Мета: сформулювати поняття про термодинамічні системи та процеси, які в них відбуваються.

Завдання: навчитися відрізняти та розраховувати параметри термодинамічних процесів.

Основні теоретичні уявлення

Робота термодинамічних процесів визначається: $A = P\Delta V$; $A = -A'$, де

A - робота газу, [Дж];

A' - робота над газом, [Дж].

Кількість теплоти: $Q = cm(t_2^0 - t_1^0) = cm\Delta t^0$, де

Q — кількість теплоти, [Дж];

t_2 — кінцева температура тіла, [С];

t_1 — початкова температура тіла

m — маса тіла, [кг];

c — питома теплоємність речовини, тобто кількість теплоти, що віддає або одержує 1кг речовини при зміні температури на 1^0 С (або 1 К), [Дж/(кг·К)];

Рівняння теплового балансу: $Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n = 0$, де

$Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ — кількість теплоти, отриманої або відданої кожним тілом.

Кількість теплоти, що виділяється при спалюванні палива: $Q = qm$, де

Q — кількість теплоти, що виділяється при спалюванні палива, [Дж];

q — питома теплота згоряння палива, [Дж/кг];

m — маса палива, [кг].

Адіабатний процес описується рівнянням Пуассона: $PV^\gamma = \text{const}$, де γ —

коефіцієнт Пуассона, який дорівнює: $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$; при цьому питомі теплоємності газу при постійному тиску і постійному обсязі:

$$c_p = \frac{i+2}{2} * \frac{R}{\mu}; \quad c_v = \frac{i}{2} * \frac{R}{\mu}.$$

Молярна теплоємність: $C_m = c_m$.

Рівняння Майєра: $C_p - C_v = R$.

Адіабатним є процес, який відбувається без теплообміну із зовнішнім середовищем, тому: $Q = 0$; при цьому: $\Delta U = A$.

Робота, зв'язана зі зміною обсягу газу, у загальному випадку обчислюється по формулі:

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV.$$

Робота газу при ізобаричному процесі: $A = p(V_2 - V_1)$,

при ізотермічному процесі :

$$A = \frac{m}{\mu} * RT \ln \frac{V_2}{V_1}$$

при адіабатичному процесі

$$A = \frac{m}{\mu} C_v (T_1 - T_2);$$

$$A = \frac{RT_1}{\gamma - 1} * \frac{m}{\mu} [1 - (\frac{V_1}{V_2})^{\gamma-1}]$$

Питання для самоконтролю знань

1. Які поняття теми «Основи термодинаміки» є основними?
2. Чому у визначенні внутрішньої енергії називають лише кінетичну енергію руху молекул та потенціальну енергію їх взаємодії між собою?
3. Чому теплоємність газу за сталого тиску більша, ніж за сталого об'єму?
4. Що таке молярна теплоємність?
5. Наведіть зв'язок між молярною та питомою теплоємністю.
6. Запишіть та обґрунтуйте закон Майєра.
7. Які процеси є адіабатними? Наведіть приклади адіабатних процесів.
8. Запишіть, поясніть та наведіть графічну інтерпретацію рівняння адіабати (рівняння Пуассона).
9. Як визначається та від чого залежить коефіцієнт Пуассона?
10. Як визначається робота газу при різних ізопроцесах?

Приклади рішення задач:

Задача 1. Визначити середню кінетичну енергію поступального руху і повну кінетичну енергію молекул гелію й азоту при температурі $T=300$ К.

Аналіз і рішення задачі

Середня кінетична енергія поступального руху молекул визначається тільки температурою.

Тому для гелію й азоту вона однакова і дорівнює:

$$\langle E_k \rangle = \frac{3}{2} kT, \text{ де}$$

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постійна Больцмана.

$$\text{Отже, } \langle E_k \rangle = \frac{3}{2} * 1,38 * 10^{-23} * 300 = 6,2 * 10^{-21} \text{ Дж.}$$

Повна енергія молекул залежить від температури, структури молекул, а також від числа ступенів свободи: $\vec{E}_n = \frac{i}{2} kT$.

Гелій – одноатомний газ. Число ступенів свободи для нього $i = 3$. Тому повна енергія молекули гелію $\vec{E}_n = \frac{3}{2} kT$ і дорівнює середній кінетичній енергії поступального руху, тобто $\vec{E}_n = \langle \epsilon_k \rangle = 6,2 * 10^{-21}$ Дж.

Азот – двоатомний газ; число ступенів свободи для нього $i = 5$.

Повна енергія його молекул:

$$\vec{E}_n = \frac{5}{2} RkT = \frac{5}{2} * 1,38 * 10^{-23} * 300 = 10,4 * 10^{-21} \text{ Дж}$$

Задача 2. Азот, що займає при тиску $1,013 \cdot 10^5$ Па об'єм $0,01 \text{ м}^3$, розширюється вдвічі. Визначити кінцевий тиск газу і роботу, зроблену газом, у випадку: а) ізобаричного; б) ізотермічного; в) адіабатичного процесів. Зобразити процес графічно і зробити аналіз рішення задачі.

Аналіз і рішення задачі:

1) При ізобарному процесі ($p=\text{const}$) робота визначається наступним чином:

$$A_1 = p_1(V_2 - V_1) = \frac{m}{\mu} R(T_2 - T_1)$$

$A = 1,013 \cdot 10^5 (2 \cdot 0,01 - 0,01) = 1,013 \cdot 10^3$ Дж, тому що за умовою задачі $V_2 = 2V_1$

2) Скориставшись законом Бойля-Маріотта, визначимо кінцевий тиск (при $T=\text{const}$): $p_1 V_1 = p_2 V_2$, звідкіля $p_2 = p_1 \frac{V_1}{V_2}$

$$p_2 = 1,013 \cdot 10^5 * \frac{0,01}{2 * 0,01} \cong 0,5 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

Роботу газу при ізотермічному процесі визначимо:

$$A_2 = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1} = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{p_1}{p_2} = p_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1};$$

$$A = 1,013 \cdot 10^5 \cdot 0,01 \ln \frac{0,01 \cdot 2}{0,01} \cong 7 \cdot 10^2 \text{ Дж.}$$

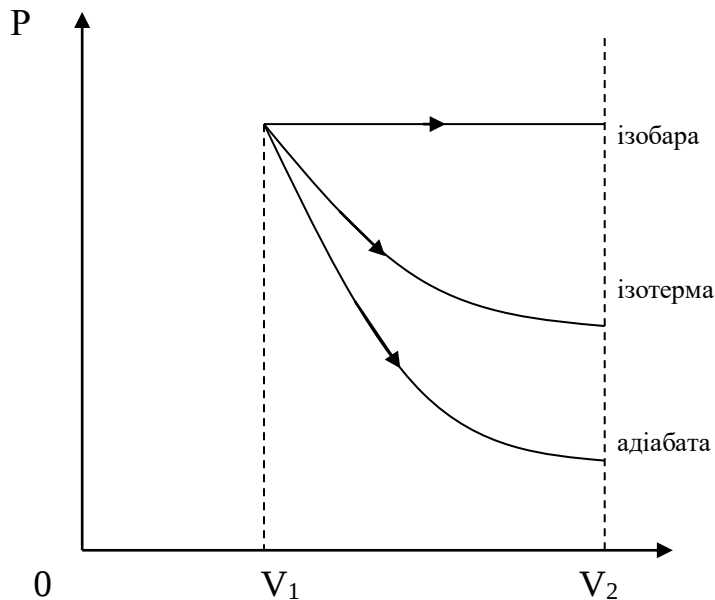
3) Скориставшись рівнянням Пуассона визначимо кінцевий тиск при адіабатичному процесі:

$$p_2 = p_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^\gamma, \text{ де } \gamma - \text{показник адіабати,}$$

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} = \frac{\frac{i+2}{2}R}{\frac{i}{2}R} = \frac{i+2}{i} = 1 + \frac{2}{i} = 1,4,$$

тому що азот – газ двохатомний – для нього число ступенів свободи $i=5$. Роботу, виконану газом, визначимо наступним чином:

$$A_3 = \frac{mRT_i}{\mu(\gamma-1)} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} \right] = \frac{1}{\gamma-1} (p_1 V_1 - p_2 V_2);$$



$$A_3 = \frac{1}{1,4-1} (1,013 \cdot 10^5 \cdot 0,01 - 0,5 \cdot 10^5 \cdot 2 \cdot 0,01) = 5,3 \cdot 10^2 \text{ Дж.}$$

Графічне зображення процесів у осях P і V представлено на рис. 3.

Висновок: як видно, при тому самому зміні обсягу найбільша робота виконується при ізобарному процесі. Це видно з графіка залежності тиску від обсягу. Робота буде тим більше, чим вище пройде крива, яка зображує процес, тобто чим більший тиск газу буде протягом процесу.

Завдання для самостійного опрацювання

2.51. Визначити показник адіабати γ ідеального газу, який при температурі $T = 350 \text{ К}$ і тиску $p = 0,4 \text{ МПа}$ має об'єм $V = 300 \text{ л}$ і теплоємність $C_v = 857 \text{ Дж/К}$.

2.52. Водень займає об'єм $V=10\text{ м}^3$ під тиском $p_1=100\text{ кПа}$. Газ нагріли при постійному об'ємі до $p_2=400\text{ кПа}$. Визначити: 1) зміну внутрішньої енергії газу ΔU ; 2) роботу газу A ; 3) кількість теплоти Q , що передана газу.

2.53. Кисень нагрівають при незмінному тиску $p=80\text{ кПа}$. Його об'єм збільшується від $V_1=1\text{ м}^3$ до $V_2=3\text{ м}^3$. Визначити: 1) зміну внутрішньої енергії кисню ΔU ; 2) роботу розширення газу A ; 3) кількість теплоти Q , що передана газу.

2.54. Азот нагрівали при постійному тиску, причому йому було передано кількість теплоти $Q=21\text{ кДж}$. Визначити роботу A , яку виконав при цьому газ, та зміну його внутрішньої енергії ΔU .

2.55. Азот масою $m=200\text{ г}$ розширюється ізотермічно при температурі $T=280\text{ К}$, причому об'єм газу збільшується у два рази. Знайти: 1) зміну внутрішньої енергії газу ΔU ; 2) виконану газом роботу A ; 3) кількість теплоти Q , отриману газом.

2.56. В циліндрі під поршнем знаходиться азот масою $m=0,6\text{ кг}$, що займає об'єм $V_1=1,2\text{ л}$ при температурі $T=560\text{ К}$. В результаті нагрівання газ розширився до $V_2=4,2\text{ л}$ при незмінній температурі. Знайти: 1) зміну внутрішньої енергії ΔU ; 2) виконану газом роботу A ; 3) кількість теплоти Q , передану газу.

2.57. При ізотермічному розширенні кисню кількість речовини якого $\nu=1\text{ кмоль}$, а температура $T=300\text{ К}$, було передано кількість теплоти $Q=2\text{ кДж}$. У скільки разів збільшився об'єм газу?

2.58. При розширенні водень виконав роботу $A=6\text{ кДж}$. Визначити кількість теплоти Q , що передана газу, якщо процес проходив: 1) ізобарне; 2) ізотермічно.

2.57. При адіабатичному стисненні кисню масою $m=29\text{ г}$ його внутрішня енергія збільшилась на $\Delta U=8\text{ кДж}$, а температура підвищилась $T_2=900\text{ К}$. Знайти: 1) підвищення температури ΔT ; 2) кінцевий тиск газу, якщо початковий тиск $p_1=200\text{ кПа}$.

2.59. При адіабатному стисненні газу його об'єм зменшився у $n=10$ разів, а тиск збільшився у $k=21,4$ рази. Визначити відношення C_p/C_v теплоємностей газу.

2.60. Кисень, що займає об'єм $V_1=1\text{ л}$ під тиском $P_1=1,2\text{ МПа}$, адіабатне розширився до $V_2=10\text{ л}$. Визначте роботу розширення газу.

2.61. Газоподібний хлор масою $m=7,1\text{ г}$ знаходиться в посудині місткістю $V_1=0,1\text{ л}$. Яку кількість теплоти Q необхідно підвести до хлору, щоб при розширенні його в порожнечу до обсягу $V_2=1\text{ л}$ температура газу залишилася незмінною?

2.62. Обсяг вуглекислого газу масою $m=0,1\text{ кг}$ збільшився від $V_1=103\text{ л}$ до $V_2=104\text{ л}$. Знайти роботу A внутрішніх сил взаємодії молекул при цьому розширенні газу.

Література [1, 3 - 10].

Практичне заняття 6. «Зворотні і незворотні теплові процеси. Цикл Карно. Теплові двигуни. Холодильні машини. ККД теплових двигунів. Друге начало термодинаміки та його статистичний зміст. Ентропія ідеального газу».

Мета: систематизувати і поглибити знання із застосування закону збереження та перетворення енергії в теплових двигунах та холодильних машинах.

Завдання: придбати практичну значущість та актуалізацію набутих знань з даної теми.

Основні теоретичні уявлення

Принцип роботи теплового двигуна: від термостата з більш високою температурою T_1 , званого нагрівачем, за цикл віднімається кількість теплоти Q_1 , а термостату з більш низькою температурою T_2 , званому холодильником, за цикл передається кількість теплоти Q_2 . При цьому здійснюється робота: $A = Q_1 - Q_2$ (див. рис. 2).

Термічний ККД циклу: $\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} * 100\%$,

де Q_1 – теплота, отримана робочим тілом від тепловіддавача;

Q_2 – теплота, передана робочим тілом теплоприймачу.

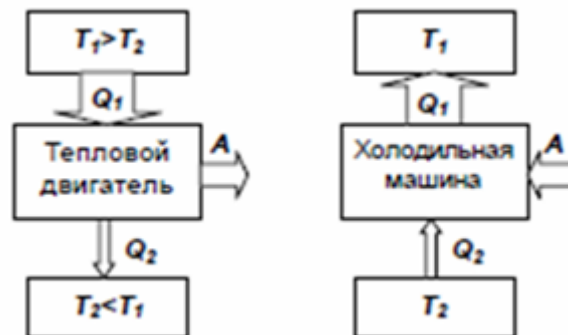


Рис 2. Схеми теплового двигуна і холодильної машини.

Термічний ККД циклу Карно: $\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$,

де T_1 і T_2 – термодинамічні температури тепловіддавача і теплоприймача.

$$\eta = A / Q_1 = (Q_1 - Q_2) / Q_1 = 1 - (Q_2 / Q_1)$$

Процес, зворотний тому, що відбувається в тепловому двигуні, використовується в холодильній машині: від термостата з більш низькою температурою T_2 за цикл віднімається кількість теплоти Q_2 і віддається термостату з більш високою температурою T_1 . При цьому $Q = Q_1 - Q_2 = A$ або $Q_1 = Q_2 + A$.

Таким чином: ККД теплового двигуна: $\eta = \frac{A'}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$, де

η — ККД теплового двигуна;

A' — робота газу при розширенні, [Дж]; $A' = Q_1 - Q_2$;
 Q_1 — кількість теплоти, що виділяється в нагрівачі, [Дж];
 Q_2 — кількість теплоти, що передається холодильнику, [Дж];
 $\eta_{\max}$ — максимальний ККД
 T — температура нагрівача, [К];
 T_2 — температура холодильника, [К].

Холодильною установкою, або машиною (ХМ), називають машину, яка шляхом витрати роботи безперервно підтримує температуру тіл нижче температури навколишнього середовища. Всі ХМ працюють за зворотним циклом: кількість теплоти Q_1 , яка віддана системою термостату T_1 , більше кількості теплоти Q_2 , отриманого від термостата T_2 , на величину роботи, здійсненої над системою.

Ефективність холодильної машини характеризує холодильний коефіцієнт η' - відношення відібраної від термостату з більш низькою температурою кількості теплоти Q_2 до роботи A , яка витрачається на приведення холодильної машини в дію: $\eta' = Q_2 / A = Q_2 / (Q_1 - Q_2)$.

Тоді (відповідно до першого початку термодинаміки): $Q_1 + Q_2 = A_c$

Ефективність холодильного циклу визначається кількістю теплоти, відведеним від охолоджуваного тіла, і роботою, витраченою на це охолодження.

Питання для самоконтролю

1. Який цикл прийнято називати прямим і який зворотним? За допомогою яких величин визначають ступінь досконалості прямих і зворотних циклів?
2. З яких процесів складається цикл Карно? Сформулюйте теорему Карно?
3. Який цикл прийнято називати регенеративним?
4. Як впливає незворотність на процес перетворення теплоти в роботу?
5. У чому сутність другого закону термодинаміки? Наведіть різні формулювання другого закону термодинаміки.
6. Наведіть аналітичний вираз другого закону термодинаміки? У чому сутність статистичного тлумачення другого закону термодинаміки.
7. У чому полягає відмінність між адіабатних і ізоентропних процесами? В яких випадках Адіабатний процес є одночасно і ізоентропним?
8. Що таке ексергія теплоти? Наведіть вираз для ексергетичного ККД.
9. Як йдуть лінії базових процесів в Ts - діаграмі ідеального газу?
10. Наведіть формули для розрахунку зміни ентропії ідеального газу в різних процесах.

Задача 1. У камері двигуна внутрішнього згоряння, працюючого на суміші кисню з воднем, утворюються гарячі водяні пари під тиском 80 МПа. Маса кисню 80 г, маса водню – 20 г. Обсяг камери згоряння 2 л. Визначити максимальний ККД такого двигуна, якщо пари викидаються при $T_2 = 900$ К.

Аналіз і рішення задачі

Найбільший ККД двигуна визначається формулою Карно:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}, \quad (1) \text{ де}$$

T_1 – температура тепловіддавача (нагрівача);

T_2 – температура тепло приймача (холодильника)

Початкову температуру T_1 пара визначимо з рівняння Клапейрона-Менделєєва:

$$pV = \left(\frac{m_1}{\mu_1} + \frac{m_2}{\mu_2}\right)RT_1 \quad (2)$$

де $m_1 = 80$ г – маса кисню;

$\mu_1 = 32 \cdot 10^{-3}$ кг/моль – молярна маса кисню;

$m_2 = 20$ г – маса водню

$\mu_2 = 2 \cdot 10^{-3}$ кг/моль – молярна маса водню;

$R = 8,31$ Дж/моль*К – універсальна газова постійна.

З рівняння (2), визначимо

$$T_1 = \frac{pV}{\left(\frac{m_1}{\mu_1} + \frac{m_2}{\mu_2}\right)R}$$
$$T_1 = \frac{80 \cdot 10^6 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{\left(\frac{0,080}{32 \cdot 10^{-3}} + \frac{0,020}{2 \cdot 10^{-3}}\right)8,31} = 1540 \text{ K}$$

Тоді ККД двигуна:

$$\eta = \frac{1540 - 900}{1540} \cdot 100\% = 41,55\%$$

Задача 2. У котлі парової машини температура 160° C , а температура холодильника 10° C . Яку максимальну роботу може теоретично зробити машина, якщо в топці, коефіцієнт корисної дії якої 60%, спалено вугілля масою 200 кг з питомою теплотою згорання $2,9 \cdot 10^7$ Дж/кг?

Аналіз та рішення задачі:

Максимальну роботу може зробити ідеальна теплова машина, що працює за циклом Карно, ККД якої $\eta = (T_1 - T_2) / T_1$, де T_1 і T_2 - абсолютні температури нагрівача і холодильника. Для будь-якої теплової машини ККД визначається за формулою $\eta = A / Q_1$, де A - робота, що здійснюються теплової машиною, Q_1 - кількість теплоти, отриманої машиною від нагрівача. З умови задачі ясно, що Q_1 - це частина кількості теплоти, що виділилася при згоранні палива: $Q_1 = \eta_1 \cdot m q$.

Отже: $A = \eta_1 \cdot m q (1 - T_2 / T_1) = 1,2 \cdot 10^9$ Дж.

Задача 3. Парова машина потужністю $N = 14,7$ кВт споживає за 1 годину роботи паливо масою $m = 8,1$ кг, з питомою теплотою згорання $q = 3,3 \cdot 10^7$

Дж/кг. Температура котла 200°C , холодильника 58°C . Визначте ККД цієї машини і порівняйте його з ККД ідеальної теплової машини.

Аналіз та рішення задачі:

ККД теплової машини дорівнює відношенню виконаної механічної роботи A до витраченої кількості теплоти $Q_1 \cdot t$, яка виділяється при згорянні палива. Кількість теплоти $Q_1 = m q$.

Здійснена за цей же час робота: $A = N t$.

Таким чином, $\eta = A / Q_1 = N t / q m = 0,198$, або $\eta \approx 20\%$.

Для ідеальної теплової машини $\eta < \eta_{\text{ид}}$.

Завдання для самостійного опрацювання

2.63. Газ, що виконує цикл Карно, віддав теплоту $Q_2 = 14 \text{ кДж}$. Визначити температуру T_1 , якщо при температурі $T_2 = 200 \text{ К}$ робота циклу $A = 6 \text{ кДж}$.

2.64. Газ, що виконує цикл Карно, віддав 67% отриманої теплоти. Визначити температуру T_2 , якщо температура $T_1 = 430 \text{ К}$.

2.65. У скільки разів збільшиться коефіцієнт корисної дії η циклу Карно при підвищенні температури від $T_1 = 380 \text{ К}$ до $T_1^1 = 560 \text{ К}$? Температура $T_2 = 280 \text{ К}$.

2.66. Газ, що виконує цикл Карно, отримує теплоту $Q = 84 \text{ кДж}$. Визначте роботу A , якщо температура T_1 , у три рази вища від температури T_2 .

2.67. У циклі Карно газ отримав теплоту $Q = 500 \text{ Дж}$ і виконав роботу $A = 100 \text{ Дж}$. Температура $T_1 = 400 \text{ К}$. Визначте температуру холодильника T_2 .

2.68 Ідеальний газ, що виконує цикл Карно, $2/3$ кількості теплоти Q віддає теплоприймачу, температура якого $T_2 = 280 \text{ К}$. Визначте температуру тепло нагрівача T_1 .

2.69. Газ, що виконує цикл Карно, отримав теплоту $Q = 4,38 \text{ кДж}$ і виконав роботу $A = 2,4 \text{ кДж}$. Визначте температуру тепло нагрівача T_1 , якщо температура теплоприймача $T_2 = 213 \text{ К}$.

2.70. Ідеальний газ виконує цикл Карно. Температура T_1 в чотири рази більша від температури T_2 теплоприймача. Яку частку ω кількості теплоти, отриманої за один цикл, газ віддає теплоприймачу?

2.71. Ідеальний газ, що виконує цикл Карно, отримав кількість теплоти $Q = 4,2 \text{ кДж}$ і виконав роботу $A = 590 \text{ кДж}$. Знайти термічний к.к.д. η цього циклу. У скільки разів температура тепло нагрівача T_1 більша від температури T_2 теплоприймача?

2.72. Холодильна машина, що працює за циклом Карно, підтримує в камері температуру $T_1 = 260 \text{ К}$. За кожний цикл машина відводить від холодної камери $Q = 40 \text{ кДж}$ енергії та передає її навколишньому середовищу, що має температуру $T_2 = 300 \text{ К}$. Визначте потужність, яку споживає холодильник, якщо тривалість циклу $t = 1,5 \text{ с}$.

Література [1, 3 - 10].

ЕКЗАМЕНАЦІЙНІ ПИТАННЯ З ДИСЦИПЛІНИ

1. Статистичні та термодинамічні методи дослідження. Термодинамічні параметри та їх характеристики (тиск, об'єм, температура, маса, молярна маса, кількість речовини тощо).
2. Основні положення МКТ та їх дослідне обґрунтування. Броунівський рух. Дифузія. Взаємодія молекул. Молекулярні сили.
3. Модель ідеального газу. Газові закони: Авогадро, Дальтона, Паскаля, Клапейрона, Менделєєва-Клапейрона.
4. Ізопроцеси. Закони Бойля-Маріотта, Гей-Люссака, Шарля, Пуассона.
5. Основне рівняння МКТ ідеального газу та його порівняння з рівнянням Менделєєва-Клапейрона. Молекулярно-кінетичне тлумачення термодинамічної температури.
6. Статистичний розподіл Максвелла, середні швидкості, експериментальна перевірка закону розподілу Максвелла.
7. Ідеальний газ в одномірному полі тяжіння. Барометрична формула. Статистичний розподіл Больцмана. Визначення числа Авогадро.
8. Фізичні основи термодинаміки (ТД). Стан ТД-системи. ТД-процеси. Робота, яка виконана системою при зміні об'єму.
9. Внутрішня енергія ТД-системи.
10. Кількість ступенів свободи. Закон рівномірного розподілу енергії по ступеням свободи молекул (закон Больцмана).
11. Внутрішня енергія ідеального газу.
12. Перший закон термодинаміки.
13. Кількість теплоти. Теплоємність. Залежність питомої теплоємності від виду процесу. Рівняння Майєра.
14. Перше начало термодинаміки та його застосування до ізопроцесів.
15. Теплові та холодильні машини. Кругові процеси (цикли). ККД теплової машини. Цикл Карно.
16. Друге начало термодинаміки та його статистичний зміст. Зведена кількість тепла. Ентропія. Межі застосування другого начала ТД.
17. Реальні гази і рідини. Сили міжмолекулярної взаємодії. Рівняння Ван-дер-Ваальса. Експериментальні ізотерми. Ізотерми Ван-дер-Ваальса.
18. Фазові переходи I і II роду. Критичний стан. Внутрішня енергія реального газу.
19. Рідкий стан. Будова рідин. Поверхневий натяг. Змочування. Капілярні явища.
20. Явища перенесення: середнє число зіткнень молекул за одиницю часу. Середня довжина вільного пробігу молекул. Явища перенесення в газах: дифузія, теплопровідність, в'язкість. Закони перенесення.
21. Явища перенесення в рідинах і твердих тілах.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Волков О.Ф., Лумпієва Т.П. Курс фізики: У 2-х т. Т.1: Фізичні основи механіки. Молекулярна фізика і термодинаміка. Електростатика. Постійний струм. Електромагнетизм: Навчальний посібник для студентів інженерно-технічних спеціальностей вищих навчальних закладів .— Донецьк: ДонНТУ, 2009. – 232 с.
2. Лумпієва Т.П. Практикум з фізики. Розв'язання задач. Частина 1: Фізичні основи механіки. Молекулярна фізика і термодинаміка. Електростатика. Постійний струм. Електромагнетизм: навчальний посібник для студентів інженерно-технічних спеціальностей вищих навчальних закладів / Т.П. Лумпієва, Н.М. Русакова, О.Ф. Волков – Донецьк: ДВНЗ «ДонНТУ», 2014. – 248 с.
3. Воловик П.М. Фізика: Для університетів. К.; Ірпінь: Перун, – 2005. – 864с.
4. Трофимова Т.И. Курс физики: учебное пособие для вузов /Т.И. Трофимова –11-е издание, М.: Изд. Центр «Академия», 2006 – 560 с.
5. Чертов А.Г., Воробьев А.А. Задачник по физике: – Учебное пособие. – М. : Академия, 2006 – 496 с.
6. Фізика для інженерів. – Під ред. Лопатинського, - Львів: Либідь, 2000.
7. Волькенштейн В.С. Сборник задач по общему курсу физики. – М. : «Наука», 2006 – 328 с.
8. Яворский Б.М., Детлаф А.А., Лебедев А.К. Справочник по физике для инженеров и студентов вузов. – М. : «Мир и образование, 2006 – 531 с.
9. Матвеев А.Н. Курс общей физики в п'яти томах. Т. 2. Молекулярная физика. М., Вища школа, 1981 – 400 с.
10. І.М. Кучерук, І.Т.Горбачук, П.П.Луцик. Загальний курс фізики у трьох томах. Т.1. Механіка. Молекулярна фізика і термодинаміка. Київ: Техніка, 1999 – 536 с.
11. І.Г. Богацька, Д.В. Головка, А.А. Маляренко, Ю.Л. Ментковський. Загальні основи фізики у 2- книгах. Кн. 1. Київ: Либідь, 1998 – 192 с.

Тести з МФ і ТД. Тест №1

1. Як називаються явища, які обумовлені зміною температури тіла?
а) електричними, б) тепловими, в) магнітними, г) механічними.
2. Чому дорівнює чисто Авогадро?
а) $6,02 \cdot 10^4$ моль. б) $6,02 \cdot 10^{21}$ моль.
в) $6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹, г) $6,02 \cdot 10^{-23}$ моль⁻¹
3. Як називається величина, що характеризує масу одного моля речовини?
а) молярна маса, б) маса моля, в) маса молекули, г) маса речовини.
4. Ким була створена теорія броунівського руху?
а) І. Ньютоном,
б) М.В. Ломоносовим,
в) Т. Юнгом,
г) А. Ейнштейном.
5. Які речовини не зберігають ні форми, ні об'єму?
а) аморфні,
б) кристалічні,
в) гази,
г) рідини.
6. Основне рівняння МКТ газу має вигляд:
а) $p = \frac{2}{3} n m_0$,
б) $p = \frac{1}{3} n m_0 \bar{v}^2$,
в) $p = \frac{3}{2} kT$,
г) $p = \frac{3}{2} m_0 n$.
7. Явище проникнення молекул однієї речовини у міжмолекулярний простір іншого називається:
а) конвекція, б) деформація, в) дифракція, г) дифузія.
8. Температура Т називається:
а) нульовою,
б) абсолютною (термодинамічною),
в) граничною.
г) кінцевою.
9. Який вираз відповідає закону Бойля - Маріотта?
а) $V/T = \text{const}$,
б) $PV = \text{const}$,
в) $p/T = \text{const}$,
г) $pT = \text{const}$.
10. Процес у теплоізоляційній системі називають:
а) адіабатним, б) ізобаричним, в) ізотермічним, г) ізохорним.

Тест 2

1. Чому дорівнює постійна Больцмана?
 - а) $1.3 \cdot 10^{12}$ кГ/моль,
 - б) $1,38 \cdot 10^{23}$ К/Дж,
 - в) $1.38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К,
 - г) $1,38 \cdot 10^{-12}$ моль/кГ.
2. Яка формула характеризує середню квадратичну швидкість молекул газу?
 - а) $\bar{v} = \frac{3kT}{mo}$,
 - б) $\bar{v} = \sqrt{\frac{3kT}{mo}}$.
 - в) $\bar{v} = \sqrt{\frac{kT}{3mo}}$.
 - г) $\bar{v} = \sqrt{\frac{3mo}{kT}}$.
3. Узагальнене рівняння стану ідеального газу було отримано:
 - а) Р. Майером, б) И. Ньютоном, в) А. Ейнштейном. г) Д.І. Менделєєвим.
4. Пар, що знаходиться в динамічній рівновазі зі своєю рідиною, називають: а) насиченим, б) ідеальним, в) водяним, г) рівноважним.
5. Яким приладом вимірюють вологість повітря?
 - а) термометром, б) психрометром, в) динамометром, г) амперметром.
6. Залежність фізичних властивостей кристалічного тіла від напряму впливу на нього називають:
 - а) ізотропністю,
 - б) ізотропією,
 - а) анізотропією,
 - г) анізотропічністю.
7. Хто вперше переконався в існуванні хаотичного руху молекул?
 - а) Ф. Перру, б) Р.Броун, в) А. Ейнштейн. г) Л. Больцман.
8. Термодинамічна система здійснює роботу. Яка формула виражає перший закон термодинаміки в цьому випадку?
 - а) $U = A - Q$,
 - б) $A = pdV$,
 - в) $Q = A - U$,
 - г) $Q = U + A$
9. Які два графіка залежності між параметрами стану газу схожі?
 - а) ізохора - ізотерма,
 - б) ізобара - ізотерма,
 - в) адіабата - ізохора.
 - г) адіабата - ізотерма.
10. Особливості молекулярного руху в рідинах вперше виявив:
 - а) Д. І. Менделєєв, б) Я.І. Френкель, в) А. Авогдаро, г) Р. Клаузиус.

Тест 3

1. Газ, взаємодія між молекулами якого дуже мала, називається:
а) реальним, б) абсолютним, в) ідеальним, г) вільним.
2. Процес зміни стану термодинамічної системи при постійному тиску називають: а) ізотермічним, б) адіабатним, а) ізобаричним, г) ізохорним.
3. Кількість речовини, що містить стільки ж молекул, скільки атомів в 0,012 кг вуглецю, називають: а) молем, б) атомною масою, в) молекулярною масою, г) числом Авогадро.
4. Значення температури за шкалою Кельвіна визначається за формулою:
а) $T = t^{\circ}\text{C} - 273$,
б) $T = 273t^{\circ}\text{C}$,
в) $T = t^{\circ}\text{C} + 273$,
г) $T = 273 - t^{\circ}\text{C}$.
5. Універсальна газова стала дорівнює:
а) 8,31 Дж/К,
б) 8.31 Дж/моль*К,
в) 3,81 моль/Дж,
г) 8.13 Дж/моль*К.
6. Який з методів дослідження використовується в молекулярній фізиці?
а) термодинамічний,
б) феноменологічний,
в) статистичний,
г) механічний.
7. Внутрішня енергія одноатомного ідеального газу дорівнює:
а) $U = 3/2 \cdot m/m \cdot R$,
б) $U = 2/3 \cdot m/m \cdot RT$,
в) $U = 3/2 \cdot m/m \cdot RT$,
г) $U = 2/3 \cdot RT$.
8. Другий закон термодинаміки сформулювали (незалежно один від одного) два з чотирьох нижче названих фізиків – це:
а) У.Томсон (лорд Кельвін), б) Р. Клаузиус, в) Л. Больцман,
г) Д. І. Менделєєв.
9. ККД теплового двигуна визначається за формулою:
а) $\text{ККД} = Q/A$,
б) $\text{ККД} = A/Q_1$,
в) $\text{ККД} = (Q - A)/A$,
г) $\text{ККД} = (Q_1 - A)/Q_1$.
10. Одне з основних понять термодинаміки – це:
а) напруга,
б) взаємодія,
в) внутрішня енергія,
г) деформація.

Тест 4

1. Відношення модуля сили пружності до площали поперечного перерізу тіла називається: а) механічною напругою, б) опором, в) перетином, г) коефіцієнтом.
2. У яких тіл існує строгий порядок у розташуванні атомів по всьому об'єму?
а) полікристалів, б) аморфних тіл, в) монокристалів, г) сипучих тіл.
3. Рівняння стану ідеального газу має вигляд:
а) $RV = pmT$,
б) $VT = mmR$,
в) $PV = mRT$,
г) $PV = mRT/\mu$.
4. Хто експериментально визначив середню швидкість молекул?
а) О.Штерн, б) І. Ньютон, в) Б. Клапейрон, г) Р. Клаузиус.
5. Стан теплової рівноваги системи тіл характеризує:
а) тиск, б) теплоємність, в) температура, г) кількість теплоти.
6. Який із методів дослідження використовується в молекулярній фізиці?
а) термодинамічний, б) феноменологічний, в) статистичний, г) механічний.
7. Графічний метод опису теплових процесів ввів французький фізик:
а) Р. Бойль, б) Б.Клапейрон, в) Б. Паскаль, г) Ф. Перру.
8. Прообраз першого термометра був винайдений:
а) Г. Галілеєм,
б) А. Цельсієм,
в) У. Томсоном,
г) Г. Фаренгейтом.
9. Перші наукові дослідження, що пояснюють перетворення теплоти в роботу, проводив:
а) С. Карно,
б) Дж. Уатт,
в) І.І. Ползунов,
г) М. В. Ломоносов.
10. Справжнє ім'я англійського фізика, відомого як граф Румфорд, було:
а) Б.Томпсон,
б) Г. Деві,
в) Дж.Уатт,
г) Дж. Джоуль.

Р.С. В кожному тесті 10 питань, до яких пропонується по 4 варіанти відповідей для вибору вірного. За правильну відповідь - 10 балів. Оцінка «3» - 50 балів, оцінка «4» - 80 балів, оцінка «5» - 90 балів і більше.

Тестові завдання з МФ:

вкажіть правильну, на Вашу думку, відповідь.

1. Тепловими називають явища, пов'язані зі зміною:
А) температури і маси тіла;
Б) форми тіла;
В) агрегатного стану або температури тіла;
Г) агрегатного стану.
2. Який газ називається ідеальним?
А) Газ, кількістю молекул у якому можна знехтувати.
Б) Газ, взаємодією між молекулами у якому можна знехтувати.
В) Газ, який перебуває під високим тиском.
Г) Будь-який газ.
3. Чим швидше рухаються молекули газу, тим його температура:
А) стабільніша;
Б) повільніше змінюється;
В) вища;
Г) нижча.
4. Температуру, за якою має припинитися тепловий рух молекул, називають:
А) 0°C ;
Б) абсолютним нулем;
В) абсолютною температурою;
Г) -273°C .
4. Укажіть варіант, у якому правильно переведено в основні одиниці: -10°C ; 23°C .
А) 263 К, 296 К;
Б) 267 К, 297 К;
В) 283 К, 293 К;
Г) 287 К, 296 К.
5. Вкажіть рядок, у якому правильно переведено в градуси Цельсія 298 К:
А) 23°C ;
Б) 21°C ;
В) 25°C ;
Г) 15°C .

Додаток Е

1. Основні фізичні постійні (округлені значення)

Фізична постійна	позначення	значення	Одиниці виміру
Постійна Авогадро	N_A	$6,02 \cdot 10^{23}$	моль ⁻¹
Молярна газова постійна	R	8,31	Дж/(моль*К)
Стандартний об'єм (молярний) при нормальних умовах	V_{om}	$22,4 \cdot 10^{-3}$	м ³ /моль
Постійна Больцмана	k	$1,38 \cdot 10^{-23}$	Дж/К
Атомна одиниця маси	а.о.м.	$1,66 \cdot 10^{-27}$	кг

2. Критичні параметри деяких газів (критична температура $T_{кр}$, критичний тиск $P_{кр}$)

Речовина	$t_k, ^\circ\text{C}$	T_k, K	P_k	P_k
			МПа	атм
Азот	-146,9	127	3,39	34,6
Аміак	132,4	405,4	11,30	115,2
Ацетилен	35,94	308,94	6,26	63,8
Ацетон	235,6	508,6	4,72	48,1
Водень	-239,91	33,09	1,30	13,23
Водяний пар	374,2	647,2	22,11	225,5
Повітря	-140,73	132,27	3,78	38,5
Гелій	-267,95	5,05	0,229	2,34
Діоксид вуглеця	75,27	348,27	3,04	31,0
Кисень	-118,38	154,62	5,08	51,8
Метан	-82,3	190,7	4,64	47,3
Метил	130	403	11,19	114
Монооксид вуглеця	-140,1	132,9	3,50	35,65
Пропан	96,8	369,8	4,26	43,4
Етиловий спирт	243	516	6,38	65,1
Аргон	-122	151	4,81	52,9
Криптон	-64	209	10,56	116

3. Константи Ван-дер-Ваальса

Речовина	$a, \text{Па} \cdot \text{м}^6/\text{моль}^2$	$b \cdot 10^{-5}, \text{м}^3/\text{моль}$
Водяний пар	0,556	3,06
Вуглекислий газ	0,364	4,26
Кисень	0,136	3,16
Аргон	0,136	3,22
Азот	0,136	3,85
Водень	0,0244	2,63
Гелій	0,00343	2,34