

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

ДО ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ ТА ЗАВДАННЯ  
ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ З ФІЗИЧНОЇ  
ХІМІЇ (розділ "Хімічна термодинаміка")  
для студентів спеціальностей: 7.090401-  
-7.090410; 7.091605; 7.091609; 7.091611

Затверджено  
на засіданні кафедри  
аналітичної та фізичної  
хімії  
Протокол № 33 від 28.05.97

Дніпропетровськ ДМетАУ 1998

УДК 541.1:536(07)

Методичні вказівки до практичних занять та завдання для самостійної роботи з фізичної хімії (розділ "Хімічна термодинаміка") для студентів спеціальностей: 7.090401-7.090410; 7.091605; 7.091609; 7.091611 (Укладачі: О.М.Арішкевич, С.І.Масленко, В.С.Баркалов та інші. - Дніпропетровськ: ДМетАУ, 1998. - 67 с.

Викладені основні поняття та закони хімічної термодинаміки, приведені формули для розрахунків термодинамічних характеристик, надані розв'язання типових задач, завдання для практичних занять та індивідуальної самостійної роботи. Приведені важливі довідників фізико-хімічні величини.

Призначенні для студентів спеціальностей: 7.090401-7.090410; 7.091605; 7.091609; 7.091611.

Укладачі: О.М.Арішкевич, д-р хім.наук, проф.  
С.І.Масленко, канд.техн.наук, доц.  
В.С.Баркалов, канд.хім. наук, доц.  
Г.І.Шевченко, канд.техн.наук, доц.  
В.П.Чинчаєва, асист.

Відповідальний за випуск О.М.Арішкевич, д-р хім.наук, проф.  
Рецензент Дворнікова Н.В., канд.хім.наук, доц. (ДМетАУ)

Редактор А.С.Кадаченко

Підписано до друку 17.09.97. Формат 60x84 1/16. Папір друк. N 2.  
Друк. офсетний. Фіз.друк.арк. 4,18. Облік.-вид.арк. 3,94.  
Умов. друк.арк. 3,88. Тираж 150 пр. Замовлення N 2.

Державна металургійна академія України  
320635, Дніпропетровськ, пр.Гагаріна,4

OOB фірма "Сервіс", 320005, пр.Гагаріна, 21

## В С Т У П

Хімічна термодинаміка - найважливіший розділ фізичної хімії. Головна мета вивчення хімічної термодинаміки - це розв'язання фундаментальних завдань технології, наприклад: кількісне обчислення енергетичних ефектів, які супроводжують хімічні реакції, використовані в технологічному процесі, визначення можливості самодовільного проходження процесу при заданих параметрах, а також умов, при яких даний процес буде проходити самодовільно з максимальним виходом продуктів взаємодії вихідних речовин.

Знання хімічної термодинаміки дає теоретичну основу для вивчення хімічних процесів у металургії і визначення шляхів їх інтенсифікації. Хімічна термодинаміка є базою теорії металургійних процесів, металографії та багатьох інших спеціальних курсів металургійних і технологічних спеціальностей.

Багаторічний досвід викладання курсу фізичної хімії свідчить, що без індивідуальних розрахункових занять студенти не мають можливості творчо застосовувати свої знання для розв'язання конкретних практичних запитань. Розв'язання завдань, складених на матеріалі металургійного виробництва, дає змогу студентам глибше засвоїти теоретичний матеріал і краще розібратися у багатьох питаннях спеціальних курсів.

При складанні методичних вказівок був використан класичний принцип будування учебного посібника "від простого до складного". На початку кожного розділу викладені основні визначення, закони, формули і рівняння, які потрібні для обчислення термодинамічних характеристик різновідмінних процесів. Наведені приклади розв'язання найтипівіших задач, запропоновані завдання для практичних занять і самостійної роботи, у кінці розділу приведені завдання для індивідуальної самостійної роботи, котрі потребують від студента активного користування всіма набутими знаннями. Методичні вказівки мають необхідний довідниковий матеріал, який дозволяє виконати будь-яке індивідуальне завдання. Разом з тим, цей матеріал розвиває навики праці з довідниковою літературою.

При виконанні індивідуальних завдань треба добре вивчити теоретичний матеріал, а вже потім виконувати необхідні розрахунки. Всі розділи індивідуального завдання виконуйте в одному зошиті. Спочатку чітко сформулюйте умови завдання і визначте шляхи його виконання. Далі приведіть у вигляді таблиці (зразок таблиці наведено у додатках) усі термодинамічні характеристики (довідників і розраховані вами), котрі будуть використані при виконанні усіх розділів завдання.

Графіки, які необхідно побудувати за умовами завдання, кресліть на міліметровій бумазі. Після виконання кожного розділу завдання зробіть конкретні висновки, вкажіть напрям і можливість самодовільної течії реакції у стандартних умовах, визначте оптимальні умови ведення цього процесу.

Виконане індивідуальне завдання повинно бути захищеним.

## 1. ЗАКОНИ ІДЕАЛЬНИХ ГАЗІВ

### 1.1. Основні визначення

Ідеальним вважається газ, який задовольняє слідчим вимогам:

- 1) газ утворений великою кількістю молекул або атомів, відстань між якими набагато більша, ніж розміри самих часток;
- 2) молекули газу характеризуються певном масом, але їх особистим об'ємом можна忽тувати;
- 3) молекули знаходяться в безперервному хаотичному русі;
- 4) зіткнення молекул між собою, а також молекул зі стінками посудин - пружні. Це означає, що кінетична енергія може передаватися від однієї молекули до другої, але вона не переходить в інші форми енергії, наприклад, в теплоту;
- 5) між молекулами не має взаємодії.

### 1.2. Основні газові закони

#### 1.2.1. Закон Бойля-Маріотта

При сталій температурі об'єм даної кількості газу обернено пропорціонально тиску, під яким знаходитьться газ:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{V_2}{V_1} .$$

#### 1.2.2. Закон Гей-Ліссака

При сталому тиску об'єм даної кількості газу прямо пропорціональний абсолютним температурам:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} .$$

#### 1.2.3. Закон Шарля

При сталому об'ємі тиски даної кількості газу прямо пропорці-

ональні абсолютною температурам:

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

#### 1.2.4. Об'єднаний закон Бойля-Маріотта та Гей-Ліссака

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} .$$

#### 1.2.5. Рівняння Менделєєва-Клапейрона

$$PV = nRT = \frac{m}{M} RT .$$

#### 1.2.6. Закон Дальтона

Якщо в об'ємному об'ємі змішати кілька газів, то кожен газ буде виявляти свій особистий тиск (парціальний тиск), такий, як би він один займав увесь об'єм. Загальний тиск буде дорівнювати сумі парціальних тисків кожного газу.

$$P_{\text{заг.}} = P_1 + P_2 + \dots + P_i ;$$

$$P_i = \frac{n_i RT}{V} = \frac{n_i}{\sum n_i} P_{\text{заг.}}$$

#### 1.2.7. Закон Авогадро

В рівних об'ємах будь-яких газів при однаковій температурі і тиску міститься однаакова кількість молекул

$$\left( \frac{V_1}{V_2} \right)_{P,T} = \left( \frac{n_1}{n_2} \right)_{P,T} .$$

За нормальних умов ( $T = 273K$ ,  $P = 1,013 \cdot 10^5$  Па) 1 кімоль будь-якого газу займає об'єм  $22,415 m^3$  та містить  $6,02 \cdot 10^{26}$  молекул.

### 1.3. Розв'язання типових задач

1.3.1. У закритій посудині знаходитьсь кисень під тиском  $1,013 \cdot 10^5$  Па і  $T = 290K$ . Після нагрівання газу тиск збільшився у 2 рази. Обчисліть кінцеву температуру газу.

Розв'язання. Так як процес йде при сталому об'ємі, то виходячи із закону Шарля

$$T_2 = \frac{T_1 \cdot P_2}{P_1} = \frac{290 \cdot 2,026 \cdot 10^5}{1,013 \cdot 10^5} = 500 \text{ К.}$$

1.3.2. Визначте тиск, який буде в посудині ємкостю 100 л, якщо в ньому при температурі  $27^\circ\text{C}$  знаходиться 300 г кисню.

Розв'язання. Використовуючи рівняння Менделєєва-Клапейрона, знаходимо тиск

$$P = \frac{mRT}{MV} = \frac{300 \cdot 10^{-3} \cdot 8,31 \cdot 300}{32 \cdot 10^{-3} \cdot 100 \cdot 10^{-3}} = 2,34 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

1.3.3. Суміш водню з азотом при  $27^\circ\text{C}$  знаходиться в посудині ємкостю 10 л. Парціальний тиск азоту дорівнює  $5,065 \cdot 10^5$  Па. Кількість водню в посудині дорівнює 0,8 моль. Визначте тиск суміші газів у посудині.

Розв'язання. По закону Дальтона знаходимо парціальний тиск водню та загальний тиск суміші газів

$$P_{H_2} = \frac{n_{H_2} \cdot RT}{V} = \frac{0,8 \cdot 8,31 \cdot 300}{10 \cdot 10^{-3}} = 1,994 \cdot 10^5 \text{ Па;}$$

$$P_{\text{зг.}} = P_{H_2} + P_{N_2} = 1,994 \cdot 10 + 0,506 \cdot 10 = 2,5 \cdot 10 \text{ Па.}$$

#### 1.4. Задачі для практичних занять і самостійної роботи

1.4.1.  $20 \text{ м}^3$  газу, який знаходиться при нормальному тиску, стиснули при сталій температурі до  $10 \text{ м}^3$ .

Визначте кінцевий тиск газу.

1.4.2. При температурі  $27^\circ\text{C}$  газ займає об'єм 1,5 л. Знайдіть об'єм газу при  $127^\circ\text{C}$ , якщо його тиск залишається незмінним.

1.4.3. Визначте, на скільки градусів треба нагріти газ, який знаходиться у закритій посудині при  $0^\circ\text{C}$ , якщо тиск його збільшиться вдвічі.

1.4.4. Визначте об'єм, який займає за нормальніх умов водень, якщо він знаходиться у балоні ємкості 30 л при 20 атмосферах і температурі  $27^\circ\text{C}$ . Виходячи із закону Авогадро, знайдіть масу газу.

1.4.5. При температурі  $27^\circ\text{C}$  і тиску 720 мм рт.ст. об'єм газу дорівнює 10 л. Визначте, який об'єм буде займати газ при  $37^\circ\text{C}$  і тиску  $2,026 \cdot 10^5$  Па.

1.4.6. Розрахуйте об'єм кисню, який знаходиться при  $17^\circ\text{C}$  і тиску 1,5 атм. Маса газу - 3,2 кг.

1.4.7. 2 кмоль водню знаходяться у замкненій посудині ємкості 2000 л при 310 К. Визначте тиск газу.

1.4.8. Визначте масу оксиду вуглецю ( $\text{CO}_2$ ), який знаходиться у закритій посудині ємкості 4  $\text{м}^3$  при 300 К, якщо тиск газу дорівнює 2 атм.

1.4.9. 1,5 кмоль азоту при тиску 500 мм рт.ст. займає об'єм 60  $\text{м}^3$ . Визначте температуру газу.

1.4.10. При температурі  $27^\circ\text{C}$  і тиску  $2,026 \cdot 10^5$  Па повітря займає об'єм 120 л. Знайдіть масу повітря і температуру, яку буде мати повітря при зміні його об'єму до  $0,15 \text{ м}^3$ . Молярна маса повітря 29 кг/кмоль.

1.4.11. Визначте молярну масу двоатомного газу та його склад, якщо 1,7 г газу при  $42^\circ\text{C}$  і 745 мм рт.ст. займає об'єм 1,4 л.

1.4.12. Маса 500 мл двоатомного газу при  $50^\circ\text{C}$  і 1,2 атм. дорівнює 1,61 г. Визначте молярну масу газу.

1.4.13. Змішили 3 л кисню з 7 л азоту. Гази взяті при однаковому тиску, що дорівнює  $1,013 \cdot 10^5$  Па. Об'єм суміші 10 л. Розрахуйте парціальний тиск кожного газу в суміші.

1.4.14. Маємо 2,4 моль йодистого водню. При нагріванні він дисоціює по рівнянні  $2 \text{HI} = \text{H}_2 + \text{I}_2$ . Ступінь дисоціації дорівнює 25%. Визначте парціальний тиск кожного компонента системи, якщо загальний тиск суміші газів -  $1,013 \cdot 10^5$  Па.

1.4.15. В посудині ємкості 30 л при  $273 \text{ K}$  знаходиться 84 г азоту та 64 г кисню. Розрахуйте парціальний тиск кожного газу і склад суміші газів в об'ємних процентах.

## 2. ПЕРШИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМІКИ

### 2.1. Основні визначення

Енергія ізольованої системи постійна.

Різні форми енергії перетворюються одна в одну в еквівалентних співвідношеннях.

Неможливо створити вічний двигун першого роду, тобто машину, яка працює без витрати енергії.

В будь-якому процесі зміна внутрішньої енергії ( $\Delta U = U_2 - U_1$ ) системи дорівнює кількості теплоти ( $Q$ ) мінус кількість роботи ( $W$ ), яку виконує система.

$$\Delta U = Q - W.$$

2.2. Основні формули для розрахунків термодинамічних функцій оборотних процесів.

2.2.1. Ізохоричний процес ( $V = \text{const}$ ):

$$2.2.1.1. \Delta U = Q_V;$$

$$2.2.1.2. Q_V = n \bar{C}_V (T_2 - T_1) = \frac{n \bar{C}_V \cdot T_1}{P_1} (P_2 - P_1);$$

$$2.2.1.3. W_V = 0;$$

$$2.2.1.4. \Delta U = \Delta H.$$

2.2.2. Ізобаричний процес ( $P = \text{const}$ ):

$$2.2.2.1. \Delta U = Q_P - W_P;$$

$$2.2.2.2. Q_P = n \bar{C}_P (T_2 - T_1) = \frac{n \bar{C}_P \cdot T_1}{V_1} \cdot (V_2 - V_1);$$

$$2.2.2.3. W_{\text{об}} = P(V_2 - V_1) = nR(T_2 - T_1) = \Delta nRT;$$

$$2.2.2.4. \Delta H = Q_P;$$

$$2.2.2.5. \Delta H = \Delta U + \Delta nRT.$$

2.2.3. Ізотермічний процес ( $T = \text{const}$ ):

$$2.2.3.1. Q_T = W_T = nRT \ln \frac{V_2}{V_1} = nRT \ln \frac{P_1}{P_2};$$

$$2.2.3.2. \Delta U_T = 0.$$

2.2.4. Адіабатичний процес ( $Q = 0$ ):

$$2.2.4.1. \Delta U = -W_{\text{аг}};$$

$$2.2.4.2. W_{\text{аг}} = \frac{1}{\gamma-1} (P_1 V_1 - P_2 V_2) = n \bar{C}_V (T_1 - T_2) = \frac{n R T_1}{\gamma-1} \left[ 1 - \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} \right] = \\ = \frac{P_1 V_1}{\gamma-1} \left[ 1 - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right] = \frac{P_1 V_1}{\gamma-1} \left( 1 - \frac{P_2 V_2}{P_1 V_1} \right) = \frac{n R}{\gamma-1} (T_1 - T_2).$$

Примітка. Для ідеальних газів  $\bar{C} = C$ , коефіцієнт Пуасона  $\gamma = \frac{C_P}{C_V}$ .

2.3. Розв'язання типових задач

2.3.1. 14 кг азоту, взятого при  $P = 2,026 \cdot 10^5$  Па та  $T = 350$  К, стискають ізотермічно до об'єму  $6 \text{ м}^3$ . Визначте теплоту, роботу процесу та кінцевий тиск у системі.

Розв'язання. Початковий об'єм азоту знайдемо з рівняння Менделєєва-Клапейрона:

$$V_1 = \frac{mRT}{MP_1} = \frac{14 \cdot 8,31 \cdot 350}{28 \cdot 10^{-3} \cdot 2,026 \cdot 10^5} = 7,18 \text{ м}^3,$$

кінцевий тиск – з рівняння Бойля-Маріотта:

$$P_2 = \frac{P_1 V_1}{V_2} = \frac{2,026 \cdot 10^5 \cdot 7,18}{6} = 2,424 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Теплоту і роботу ізотермічного процесу розрахуємо по рівнянню:

$$Q_T = W_T = \frac{m}{M} RT \ln \frac{V_2}{V_1} = \frac{14 \cdot 8,31 \cdot 350}{28 \cdot 10^{-3}} \ln \frac{6}{7,18} = -267,58 \text{ кДж.}$$

2.3.2. Розрахуйте теплоту та роботу при адіабатичному стисненні 128 г оксиду сірки ( $\text{IV}$ ) при підвищенні температури від  $0^\circ\text{C}$  до  $373$  К,  $\gamma = 1,4$ .

Розв'язання. Роботу адіабатичного стиснення можна визначити за рівнянням:

$$W_{\text{аг}} = \frac{nR}{\gamma-1} (T_1 - T_2) = \frac{128 \cdot 10^{-3} \cdot 8,31}{64 \cdot 10^{-3} (1,4-1)} (273 - 373) = -4,15 \text{ кДж.}$$

2.3.3 Визначте роботу випарювання 3,6 кг води при нормальній температурі кипіння. Об'ємом рідини у порівнянні з об'ємом пару можна знектувати.

Розв'язання. Нормальна температура кипіння – це температура кипіння при зовнішньому тиску  $1,013 \cdot 10^5$  Па. Для води вона дорівнює  $373$  К. Так як процес випарювання води проходить при сталому тиску, то роботу можна обчислити по рівнянню:

$$W_{\text{об}} = P(V_2 - V_1).$$

Кінцевий об'єм пару розрахуємо:

$$V = \frac{nRT}{P}.$$

Так як об'ємом рідини можна знектувати, то робота визначатиметься по рівнянню:

$$W_{\text{об}} = nRT = \frac{3,6}{18 \cdot 10^{-3}} \cdot 8,31 \cdot 373 = 619,93 \text{ кДж.}$$

2.4. Задачі для практичних занять та самостійної роботи

2.4.1. Визначте, які з перелічених характеристик:  $Q, W, H, \Delta U, \Delta H, T, \Delta T, P, V, P\Delta V$  можуть бути більше, менше або рівними нулю; які з них характеризують стан системи, а які - процес.

2.4.2. Розрахуйте роботу, теплоту та зміну внутрішньої енергії при адіабатичному розширенні 10 моль водню від 30 до 300 л. Початкова температура газу 300К,  $\gamma = 1.4$ .

2.4.3. Знайдіть роботу розширення 2,9 кг повітря при нагріванні від 280 до 560 К та тиску  $1,013 \cdot 10^5$  Па. Молярна маса повітря становить 29 кг/кімоль.

2.4.4. Розрахуйте роботу, теплоту та зміну внутрішньої енергії при ізотермічному стисненні 28 кг азоту, взятому при  $P=1,013 \cdot 10^5$  Па,  $T = 500$  К, до об'єму  $6,56 \text{ m}^3$ .

2.4.5.  $30 \text{ m}^3$  газу, взятому при  $T=273$  К та  $P=1,013 \cdot 10^5$  Па, стискають ізотермічно до  $1,013 \cdot 10^6$  Па. Знайдіть роботу стиснення, теплоту процесу та кінцевий об'єм газу.

2.4.6.  $30 \text{ m}^3$  адіабатично стискають від  $1,013 \cdot 10^5$  Па до  $2,026 \cdot 10^5$  Па. Розрахуйте роботу стиснення та кінцевий об'єм газу, якщо  $\gamma = 2$ .

2.4.7. При 300 К газ ізотермічно розширюється від  $2 \cdot 10^4$  до  $10 \cdot 10^4 \text{ m}^3$ , поглинаючи при цьому  $4,014 \cdot 10^5$  Дж тепла. Розрахуйте роботу процесу та кількість молей газу.

2.4.8. Знайдіть роботу ізотермічного ( $T=320$ К) розширення суміші, складеної з 64 кг кисню та 2 кмоль азоту, від  $5,065 \cdot 10^5$  до  $1,013 \cdot 10^5$  Па.

2.4.9. Розрахуйте роботу, теплоту, зміну ентальпії та внутрішньої енергії при процесі нагрівання 3,2 кг кисню, який знаходиться у закритій посудині при 298К, якщо тиск газу змінився від 1,5 атм до  $4,052 \cdot 10^5$  Па,  $C_{P,O_2} = 29$  Дж/моль·К.

2.4.10. 132 г оксиду вуглецю ( $\bar{U}$ ) знаходиться при 0°C та тиску  $1,013 \cdot 10^5$  Па. Визначте роботу, теплоту, зміну ентальпії та внутрішньої енергії при ізохоричному нагріванні системи при досягненні тиску 2 атм.  $\bar{C}_{P,U_2} = 37$  Дж/моль·К.

2.4.11. 400 л азоту знаходяться при 27°C та тиску 720 мм рт.ст. Після нагрівання газ, розширившись при сталому тиску, зайняв об'єм, який дорівнює 4  $\text{m}^3$ . Розрахуйте теплоту та роботу процесу.  $\bar{C}_{P,N_2} = 29$  Дж/моль·К.

2.4.12. 440 г оксиду вуглецю ( $\bar{U}$ ) ізотермічно розширюється до  $V_2 = 2V_1$ .  $T = 400$  К. Початковий тиск 2 атм. Знайдіть теплоту, роботу, зміну ентальпії та внутрішньої енергії.

2.4.13. Розрахуйте кількість теплоти, необхідної для нагрівання 56 г азоту від 27 до 127°C. Об'єм газу не змінюється.

$$\bar{C}_{P,N_2} = 29 \text{ Дж/моль·К.}$$

2.4.14. 4 г водню знаходиться у посудині при  $T = 0^\circ\text{C}$ ,  $P = 5$  атм. Знайдіть роботу процесу, якщо після нагрівання при сталому тиску газ зайняв об'єм 15 л.

2.4.15. Газ, розширяючись при сталому тиску від 10 до 16 л, поглинає 30 кал тепла. Розрахуйте зміну внутрішньої енергії та роботу процесу.  $P = 1$  атм.

### 3. ТЕПЛОЄМКІСТЬ. ТЕПЛОТА НАГРІВАННЯ

#### 3.1. Основні визначення

Теплоємкість - це кількість теплоти, яка витрачається для нагрівання одиниці маси речовини на 1 К.

Розрізняють молярну ( $C$ ) та питому ( $C_n$ ), ізобарну ( $C_p$ ) та ізохорну ( $C_v$ ), істинну ( $C$ ) та середню ( $\bar{C}_{T_1+T_2}$ ) теплоємкості.

Теплота нагрівання - це кількість теплоти, яка витрачається для нагрівання одного моля речовини від  $T_1$  до  $T_2$  при  $P=1,013 \cdot 10^5$  Па.

3.2. Основні формули для розрахунків теплоємкості та теплоти нагрівання

#### 3.2.1. Для ідеальних газів:

$$\text{одноатомного } C_v = 3/2R;$$

$$\text{двоатомного } C_v = 5/2R;$$

$$\text{триатомного } C_v = 3R;$$

$$C_p = C_v + R.$$

#### 3.2.2. Для твердих та рідких речовин:

$$C_p \approx C_v.$$

#### 3.2.3. Питома теплоємкість:

$$C_n = \frac{C}{M}.$$

#### 3.2.4. Істинна молярна теплоємкість:

$$C_p = a + bT + cT^2 + dT^{-2}$$

3.2.5. Середня молярна теплоємкість:

$$3.2.5.1. \bar{C}_{P,T_1+T_2} = \alpha + \frac{\beta}{2}(T_2+T_1) + \frac{c}{3}(T_2^2 + T_2 \cdot T_1 + T_1^2) + \frac{c'}{T_2 \cdot T_1};$$

$$3.2.5.2. \bar{C}_{P,T_1+T_2} = \frac{(H_{T_2}^\circ - H_o^\circ) - (H_{T_1}^\circ - H_o^\circ)}{T_2 - T_1};$$

$$3.2.5.3. \bar{C}_{P,0+T} = \frac{(H_T^\circ - H_o^\circ)}{T}$$

3.2.6. Теплоємкість суміші речовин:

$$3.2.6.1. C = \frac{C_1 \cdot \% \text{ мол.1} + C_2 \cdot \% \text{ мол.2} + \dots + C_i \cdot \% \text{ мол.} i}{100};$$

$$3.2.6.2. C_n = \frac{C_{n,1} \cdot \% \text{ MAC.1} + C_{n,2} \cdot \% \text{ MAC.2} + \dots + C_{n,i} \cdot \% \text{ MAC.} i}{100}.$$

3.2.7. Теплота нагрівання 1 моля речовини:

$$3.2.7.1. Q_{P,T_1+T_2} = \alpha(T_2-T_1) + \frac{\beta}{2}(T_2^2 - T_1^2) + \frac{c}{3}(T_2^3 - T_1^3) + \frac{c'(T_2 - T_1)}{T_2 \cdot T_1};$$

$$3.2.7.2. Q_{P,T_1+T_2} = (H_{T_2}^\circ - H_o^\circ) - (H_{T_1}^\circ - H_o^\circ);$$

$$3.2.7.3. Q_{P,0+T} = (H_T^\circ - H_o^\circ).$$

3.2.8. Теплота нагрівання суміші речовин:

$$Q_{P,T_1+T_2} = n_1 \cdot Q_{P,1,T_1+T_2} + n_2 \cdot Q_{P,2,T_1+T_2} + \dots + n_i \cdot Q_{P,n,T_1+T_2}.$$

3.2.9. Теплота нагрівання 1 моля речовини з врахуванням фазових перетворень:

$$Q_{P,T_1+T_2} = \sum_{T_1}^{T_2} \int C_P dT + \sum Q_{\varphi.n.}$$

3.3. Розв'язання типових задач

3.3.1. Розрахуйте істинну ізобарну та ізохорну молярну теплоємкість FeO при 1000 К.

$$\text{Розв'язання. } C_P = \alpha + \beta T + c T^2 + c' T^{-2} =$$

$$= 50,80 + 8,61 \cdot 10^{-3} \cdot 10^3 + (-3,31 \cdot 10^5) \cdot 1000^{-2} = 59,08 \text{ дж/моль} \cdot \text{К.}$$

$$C_{P,FeO} \approx C_{V,FeO}.$$

3.3.2. Визначте середню питому ізохорну теплоємкість оксиду заліза (ІІ) від 300 до 700 К.

Розв'язання. Середня ізобарна теплоємкість FeO розрахуємо за допомогою рівняння:

$$\begin{aligned} \bar{C}_{P,T_1+T_2} &= \alpha + \frac{\beta}{2}(T_2+T_1) + \frac{c}{3}(T_2^2 + T_2 \cdot T_1 + T_1^2) + \frac{c'}{T_2 \cdot T_1} = \\ &= 50,80 + \frac{8,61 \cdot 10^{-3}}{2} (700+300) - \frac{3,31 \cdot 10^5}{700 \cdot 300} = 53,52 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}. \end{aligned}$$

$$\bar{C}_V = \bar{C}_P; \quad \bar{C}_{n,V} = \frac{\bar{C}_V}{M} = \frac{53,52}{47,8 \cdot 10^{-3}} = 0,74 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

3.3.3. Гідроксид натрію плавиться при 595 К, теплота його плавлення 6,36 кДж/моль. Розрахуйте витрати тепла на ізобарне плавлення 1 кг гідроксиду натрію в інтервалі температур від 298 до 595 К, якщо залежність його ізобарної молярної теплоємкості від температури визначається рівнянням

$$C_P = 7,34 + 125,00 \cdot 10^{-3} T + 13,38 \cdot 10^5 T^{-2}.$$

Розв'язання. Теплоту, необхідну для того, щоб розплавити 1 кг NaOH, знятий при 298K, можна визначити за рівнянням:

$$\begin{aligned} Q_P &= Q_{P,T_1+T_2} + Q_{\text{нл.}} = n \int_{298}^{595} C_P dT + n \cdot \Delta H_{\text{нл.}} = \\ &= \frac{1}{40 \cdot 10^{-3}} \left[ 7,34 \cdot (595-298) + \frac{125 \cdot 10^{-3}}{2} (595^2 - 298^2) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{13,38 \cdot 10^5 (595-298)}{595 \cdot 298} \right] + \frac{6,36 \cdot 10^3}{40 \cdot 10^{-3}} = 683,69 \text{ кДж}. \end{aligned}$$

3.4. Задачі для практичних занять та самостійної роботи

3.4.1. Розрахуйте істинну молярну ізобарну та ізохорну теплоємкість оксиду вуглецю ( $\text{CO}_2$ ) при 1000 К.

3.4.2. Розрахуйте середню молярну ізобарну та ізохорну теплоємкість оксиду вуглецю ( $\text{CO}_2$ ) в ° інтервалі температур від 298 до 1000 К.

3.4.3. Залежність середньої молярної теплоємкості від температури визначається рівнянням

$$\bar{C}_{P,273 \div 1000} = 0,20 + 6,92 \cdot 10^{-5} \cdot T - 1,7 \cdot 10^{-8} \cdot T^2.$$

Визначте істинну теплоємкість газу при 800 К.

3.4.4. Розрахуйте середню молярну ізобарну та ізохорну теплоємкість водню в інтервалі температур 300 ÷ 600 К.

3.4.5. Залежність середньої молярної теплоємкості метану при сталому об'ємі від температури визначається рівнянням

$$\bar{C}_{V,273 \div 800} = 6,01 + 37,33 \cdot 10^{-3} \cdot T - 5,71 \cdot 10^{-6} \cdot T^2.$$

Обчисліть істинну молярну ізобарну теплоємкість метану при 500 К.

3.4.6. Атомні ізобарні теплоємкості заліза, нікеля, марганцю та вуглецю при 298 К відповідно с дорівнюють 25,0; 26,1; 26,3 і 8,5  $\text{Дж}/\text{моль} \cdot \text{К}$ . Розрахуйте питому теплоємкість сталі, яка вміщує 0,6% С; 25,0% Ni; 5,0% Mn, прийнявши, що теплоємкість сталі є адитивною функцією її складу.

3.4.7. Розрахуйте кількість тепла, необхідну для плавлення 5 кг заліза, яке має початкову температуру 298 К.

Температура плавлення заліза 1812 К, теплота плавлення 15,5  $\text{Дж}/\text{моль}$ .

3.4.8. Розрахуйте кількість тепла, необхідного для нагрівання 5 кг заліза від 298 до 2000 К.

Температура плавлення заліза 1812 К, теплота плавлення 15,5  $\text{Дж}/\text{моль}$ .

3.4.9. Розрахуйте кількість тепла, необхідного для нагрівання 10 кг суміші речовин від 300 до 500 К. Суміш має склад (по масі): 40%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  і 60%  $\text{FeO}$ .

3.4.10. Знайдіть кількість тепла, яке зможуть унести  $10 \text{ м}^3$  димового газу, що має температуру 1000К при тиску  $1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$ .

Температура навколошньої середи 300 К. Склад димового газу (по об'єму):

$$\text{CO}_2 - 10%; \quad \text{O}_2 - 10%; \quad \text{H}_2\text{O}(g) - 15%; \quad \text{N}_2 - 65%.$$

3.4.11. Алуміній плавиться при 659 С, його питома теплота дорівнює 95,6 кал/г. Розрахуйте кількість теплоти, необхідну для плавлення 1 кг алумінію, якщо його початкова температура 298 К.

3.4.12. В резервуарі ємкості  $2 \text{ м}^3$  при 298 К і тиску  $1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$  утримується метан. Розрахуйте кількість тепла, яке необхідно додати газу, щоб його тиск став рівним  $4,052 \cdot 10^5 \text{ Па}$ .

3.4.13. Суміш складається з 2 г водню та 16 г кисню. Їх питомі ізобарні теплоємкості дорівнюють відповідно 14,41 та 0,92  $\text{Дж}/\text{кг} \cdot \text{К}$ .

Розрахуйте витрату тепла при охолодженні суміші на  $100^\circ$  при сталому об'ємі.  $C_p \neq f(T); \gamma = 1,4$  (для обох газів).

3.4.14. Резервуар ємкості  $1 \text{ м}^3$  заповнений азотом до тиску  $5,065 \cdot 10^5 \text{ Па}$ . Початкова температура газу 300 К. Середня молярна ізобарна теплоємкість азоту дорівнює 29,1  $\text{Дж}/\text{моль} \cdot \text{К}$ . Розрахуйте кількість тепла, яке необхідно відняти, щоб резервуар зберіг температуру 300 К.

3.4.15. Кімната має площину  $20 \text{ м}^2$  і висоту 3 м. Розрахуйте кількість тепла, яку треба витратити, щоб нагріти повітря в цій кімнаті від 15 до  $25^\circ\text{C}$  при повній термоізоляції.

3.5. Завдання для самостійної роботи (домашні завдання)

3.5.1. Для запропонованої речовини розрахуйте за допомогою температурного ряду  $C_p$  і  $C_V$  для чотирьох-семи заданих температур. Накресліть графік залежності  $C=f(T)$  та з'ясуйте, як впливає зміна температури на теплоємкість.

3.5.2. Для запропонованої речовини розрахуйте середню ізобарну теплоємкість в інтервалі температур  $298 \div T$ :

3.5.2.1. по температурному ряду;

3.5.2.2. по значеням тепловмісту речовин.

Порівняйте одержані результати.

3.5.3. Розрахуйте теплоту нагрівання 1 кг запропонованої речовини від 298 К до  $T$  К:

3.5.3.1. по температурному ряду;

3.5.3.2. по значеням тепловмісту речовини.

Порівняйте одержані результати.

3.5.4. Розрахуйте теплоту нагрівання 2 кг запропонованої суміші речовин від 298 К до  $T$  К:

3.5.4.1. по температурному ряду;

3.5.4.2. по значенням тепловістю речовини.

Порівняйте одержані результати. Зробіть висновок, який метод найбільш точний.

#### 4. ТЕРМОХІМІЯ. ТЕПЛОВИЙ ЕФЕКТ РЕАКЦІЇ

##### 4.1. Основні визначення

Тепловий ефект реакції – це зміна ентальпії ( $\Delta H$ ) або внутрішньої енергії ( $\Delta U$ ) хімічної системи, розрахована на стехіометричну кількість реагуючих речовин.

Розрізняють ізобарний  $-\Delta H$  (при  $P = \text{const}$ ) та ізохорний  $-\Delta U$  (при  $V, T = \text{const}$ ) теплові ефекти.

Якщо  $\Delta H < 0$ , то реакція – екзотермічна, якщо  $\Delta H > 0$ , то – ендотермічна.

##### 4.2. Основні формули для розрахунку теплового ефекту реакції

$$4.2.1. \Delta H = H_2 - H_1 = Q_P;$$

$$4.2.2. \Delta U = U_2 - U_1 = Q_V;$$

$$4.2.3. \Delta H = \Delta U + P\Delta V = \Delta U + \Delta nRT.$$

4.2.4. Стандартний тепловий ефект реакції  
( $T = 298 \text{ K}$ ,  $P = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ ):

$$4.2.4.1. \Delta H_{298}^\circ = \sum_i^i (n_i \Delta H_{f,298}^\circ)_{\text{кінц.}} - \sum_i^i (n_i \Delta H_{f,298}^\circ)_{\text{вих.}}$$

$$4.2.4.2. \Delta H_{298}^\circ = \sum_i^i (n_i \Delta H_{j^2,298}^\circ)_{\text{вих.}} - \sum_i^i (n_i \Delta H_{j^2,298}^\circ)_{\text{кінц.}}$$

$$4.2.4.3. \Delta H_{298}^\circ = \sum_i^i (n_i \Delta H_{j^3,298}^\circ)_{\text{кінц.}} - \sum_i^i (n_i \Delta H_{j^3,298}^\circ)_{\text{вих.}}$$

$$4.2.4.4. \Delta H_{298, X}^\circ = \pm m \cdot \Delta H_{298, I}^\circ \pm n \cdot \Delta H_{298, II}^\circ \pm \dots,$$

$$\text{якщо } X = \pm m \cdot I \pm n \cdot II \pm \dots$$

4.2.5. Тепловий ефект реакції при температурі  $T$ :

$$4.2.5.1. \Delta H_T^\circ = \Delta H_{298}^\circ + \Delta \alpha (T-298) + \frac{\Delta \beta}{2} (T^2-298^2) + \\ + \frac{\Delta C}{3} (T^3-298^3) + \frac{\Delta C' (T-298)}{T \cdot 298};$$

$$4.2.5.2. \Delta H_T^\circ = \Delta H_{298}^\circ + \Delta (H_T^\circ - H_0^\circ) - \Delta (H_{298}^\circ - H_0^\circ);$$

$$4.2.5.3. \Delta H_T^\circ = \Delta H_0^\circ + \Delta (H_T^\circ - H_0^\circ);$$

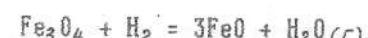
$$4.2.5.4. \Delta H_{T_2}^\circ = \Delta H_{T_1}^\circ + \Delta \bar{C}_{P, T_1 \rightarrow T_2} \cdot (T_2 - T_1).$$

4.2.6. Тепловий ефект реакції з врахуванням фазових перетворень

$$4.2.6.1. \Delta H_T^\circ = \Delta H_{298}^\circ + \int_{298}^{T_{\text{нр}}} \Delta C_P dT + \Delta H_{\text{nр.}} + \int_{T_{\text{nр.}}}^{T_{\text{нн.}}} \Delta C_P dT$$

4.3. Розв'язання типових задач

4.3.1. Розрахуйте стандартний тепловий ефект реакції

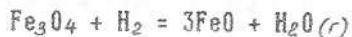


використавши стандартні теплоти утворення реагуючих речовин.

Розв'язання. Скористуємось рівнянням

$$\Delta H_{298}^{\circ} = \Delta H_{f,298,H_2O}^{\circ} + 3\Delta H_{f,298,FeO}^{\circ} - \Delta H_{f,298,Fe_3O_4}^{\circ} = \\ = -241,81 + 3(-264,85) - (-1117,13) = 80,77 \text{ кДж.}$$

#### 4.3.2. Розрахуйте тепловий ефект реакції



при 1000 К, якщо стандартний тепловий ефект реакції дорівнює 80,77 кДж.

Розв'язання. Розрахунок проведемо по рівнянню:

$$\Delta H_{1000}^{\circ} = \Delta H_{298}^{\circ} + \Delta \alpha / (1000 - 298) + \frac{\Delta b}{2} (1000^2 - 298^2) + \frac{\Delta c' / (1000 - 298)}{1000 \cdot 298} .$$

$$\Delta \alpha = \alpha_{H_2O(r)} + 3\alpha_{FeO} - \alpha_{Fe_3O_4} - \alpha_{H_2} = 30,00 + 3 \cdot 50,80 - 86,27 - \\ - 27,88 = 68,25 \text{ Дж/К} ;$$

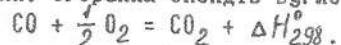
$$\Delta b = b_{H_2O(r)} + 3b_{FeO} - b_{Fe_3O_4} - b_{H_2} = 10^{-3} (10,71 + 3 \cdot 8,61 - 203,92 - \\ - 3,26) = -175,64 \cdot 10^{-3} \text{ Дж/К}^2 ;$$

$$\Delta c' = c'_{H_2O(r)} + 3c'_{FeO} - c'_{Fe_3O_4} - c'_{H_2} = 10^5 (0,33 - 3 \cdot 3,31 - 0,5) = \\ = -10,1 \cdot 10^5 \text{ Дж/К} ;$$

$$\Delta H_{1000}^{\circ} = 80,77 \cdot 10^3 + 68,25 (1000 - 298) - \frac{175,64 \cdot 10^{-3}}{2} (1000^2 - 298^2) - \\ - \frac{10,1 \cdot 10^5 (1000 - 298)}{1000 \cdot 298} = 46,38 \text{ кДж.}$$

4.3.3. Розрахуйте стандартну теплоту згорання оксиду вуглецю ( $\text{I}$ ), якщо стандартні теплоти утворення оксиду вуглецю ( $\text{II}$  і  $\text{IV}$ ) відповідно дорівнюють -110,53 та -393,51 кДж/моль.

Розв'язання. Згорання оксидів вуглецю ( $\text{II}$ ) проходить по реакції



Для розрахунку теплового ефекту цієї реакції використаємо рівняння:

$$\Delta H_{298,X}^{\circ} = \pm m \cdot \Delta H_{298,\text{I}}^{\circ} \pm n \cdot \Delta H_{298,\text{II}}^{\circ} \pm \dots .$$

Як допоміжні реакції візьмемо слідуючі:

$$\text{I. } C + \frac{1}{2} O_2 = CO \quad | -1 \quad \Delta H_{298,\text{I}}^{\circ} = -110,53 \text{ кДж}$$

$$\text{II. } C + O_2 = CO_2 \quad | +1 \quad \Delta H_{298,\text{II}}^{\circ} = -393,51 \text{ кДж}$$

Індикатором для рівняння I буде CO, знак "-",  $m = -1$ .

Індикатором для рівняння II буде CO<sub>2</sub>, знак "+",  $n = +1$ .

Проведемо перевірку правильності вибору допоміжних реакцій, індикаторів, знаків та коефіцієнтів:

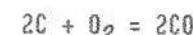
$$-C - \frac{1}{2} O_2 + C + O_2 = -CO + CO_2 ;$$

$$CO + \frac{1}{2} O_2 = CO_2 .$$

Так як перевірка "позитивна", то

$$\Delta H_{298,X}^{\circ} = -\Delta H_{298,\text{I}}^{\circ} + \Delta H_{298,\text{II}}^{\circ} = -(-110,53) + (-393,51) = -292,98 \text{ кДж}$$

#### 4.3.4. Знайдіть тепловий ефект реакції



при 1000 К, якщо стандартний тепловий ефект її дорівнює -211,06 кДж.

Розв'язання. Розрахунок теплового ефекту проведемо по рівнянню

$$\Delta H_{1000}^{\circ} = \Delta H_{298}^{\circ} + \Delta (H_{1000}^{\circ} - H_0^{\circ}) - \Delta (H_{298}^{\circ} - H_0^{\circ}) .$$

По таблицям знайдемо значення тепловмісту речовин та розрахуємо їх зміну внаслідок реакції:

$$\Delta (H_{1000}^{\circ} - H_0^{\circ}) = 2(H_{1000}^{\circ} - H_0^{\circ})_{CO} - 2(H_{1000}^{\circ} - H_0^{\circ})_C - (H_{1000}^{\circ} - H_0^{\circ})_{O_2} = \\ = 2 \cdot 30,35 - 2 \cdot 12,83 - 31,39 = 3,75 \text{ кДж} ;$$

$$\Delta(H_{298}^{\circ} - H_o) = 2(H_{298}^{\circ} - H_o)_{CO} - 2(H_{298}^{\circ} - H_o)_C - (H_{298}^{\circ} - H_o)_{O_2} = \\ = 2 \cdot 8,67 - 2 \cdot 1,05 - 8,68 = 6,56 \text{ кДж};$$

$$\Delta H_{1000}^{\circ} = -211,06 + 3,75 - 6,56 = -213,87 \text{ кДж}.$$

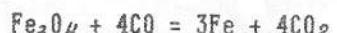
4.4. Задачі для практичних занять та самостійної роботи

4.4.1. Розрахуйте стандартний тепловий ефект реакції



по стандартним теплотам утворення реагуючих речовин.

4.4.2. Розрахуйте стандартний тепловий ефект реакції



по стандартним теплотам згорання реагуючих речовин.

4.4.3. Знайдіть тепловий ефект реакції



при 298 К шляхом алгебраїчного підсумування допоміжних реакцій, стандартні теплові ефекти яких відомі.

4.4.4. Знайдіть стандартний тепловий ефект реакції



по енергіям зв'язку реагуючих речовин.

4.4.5. Розрахуйте, на яку величину при  $T = 298$  К відрізняється тепловий ефект при сталому тиску від теплового ефекту при сталому об'ємі для реакції



4.4.6. Розрахуйте тепловий ефект реакції



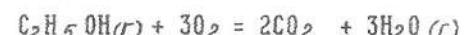
при 1000 К по температурному ряду теплоємкості.

4.4.7. Розрахуйте тепловий ефект реакції



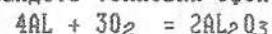
при 1000 К по значенням теплоємкості.

4.4.8. Розрахуйте тепловий ефект реакції



при 200 К та стандартному тиску, якщо відомо, що середні молярні ізобарні теплоємкості в інтервалі температур від 298 до 200 К для спирту, кисню, оксиду вуглецю ( $\bar{IV}$ ) та водяної пари дорівнюють 99,48; 31,74; 45,52 та 36,02 Дж/моль·К. Тепловий ефект реакції за стандартних умов дорівнює -1277,65 кДж.

4.4.9. Знайдіть тепловий ефект реакції



при 1000 К та стандартному тиску, якщо стандартний тепловий ефект реакції дорівнює -3351,4 кДж.

Температура плавлення алюмінію 932 К, а теплота плавлення 2,5 ккал/моль.

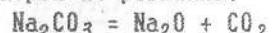
4.4.10. У топці згоряє кам'яне вугілля, що має 65% С. В паливних газах міститься 13% (мол.)  $CO_2$  та 1% (мол.)  $CO$ , решта азот та кисень. Розрахуйте теплоту згоряння 1 кг вугілля, якщо відомо, що теплоти утворення оксиду вуглецю ( $\bar{IV}$ ) та оксиду вуглецю ( $\bar{II}$ ) дорівнюють -393,51 та -110,53 кДж/моль.

4.4.11. Стандартна теплота утворення водяної пари -241,81 кДж/моль, стандартна теплота згоряння вуглецю -393,51 кДж/моль. Розрахуйте тепловий ефект реакції  $C + 2H_2O(r) = CO_2 + 2H_2$  при 1000 К. Коефіцієнти рівняння  $C_p = f(T)$  візьміть з таблиць.

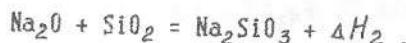
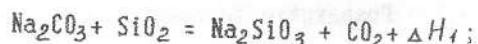
4.4.12. Стандартні теплоти утворення оксидів вуглецю ( $\bar{II}$  та  $\bar{IV}$ ) дорівнюють -110,53 та -393,51 кДж/моль. Знайдіть теплоту згоряння оксиду вуглецю ( $\bar{II}$ ) при 1000 К. Коефіцієнти рівняння  $C_p = f(T)$  візьміть з таблиць.

4.4.13. Розрахуйте теплоту утворення метану, якщо його теплота згоряння дорівнює -802,82 кДж/моль, а теплоти згоряння водню та вуглецю дорівнюють -241,81 та -393,51 кДж/моль.

4.4.14. Розрахуйте, скільки тепла треба витратити для розкладу 10,6 кг карбонату натрію по рівнянню:

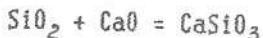


за допомогою слідуючих даних:



якщо  $\Delta H_1$  та  $\Delta H_2$  відповідно дорівнюють 86,80 та -232,51 кДж.

#### 4.4.15. Стандартний тепловий ефект реакції



дорівнює -88,97 кДж. Знайдіть стандартну теплоту утворення  $\text{CaSiO}_3$  якщо стандартні теплоти утворення оксидів кремнію та кальцію відповідно дорівнюють -910,94 та 635,09 кДж/моль.

#### 4.5. Завдання для самостійної роботи (домашні завдання)

##### 4.5.1. Для запропонованої реакції розрахуйте $\Delta H_{298}^\circ$ :

- 4.5.1.1. по стандартним теплотам утворення реагуючих речовин;
- 4.5.1.2. по стандартним теплотам згоряння реагуючих речовин;
- 4.5.1.3. шляхом алгебраїчного підсумування допоміжних реакцій, стандартні теплові ефекти яких відомі;
- 4.5.1.4. по стандартним енергіям зв'язку реагуючих речовин (якщо є необхідні дані).

Порівняйте одержані результати. Визначте термохімічний тип реакції.

##### 4.5.2. Для запропонованої реакції розрахуйте $\Delta H_T^\circ$ :

- 4.5.2.1. по температурним рядам теплоємностей реагуючих речовин;

##### 4.5.2.2. по значенням тепловмісту реагуючих речовин;

Порівняйте отримані результати. Визначте термохімічний тип реакції.

- 4.5.3. Для запропонованої реакції за допомогою рівняння (4.2.5.1) розрахуйте тепловий ефект для чотирьох-сесії заданих температур. Накресліть графік залежності  $\Delta H_T^\circ = f(T)$  та установіть, як зміна температури буде впливати на тепловий ефект реакції та як це узгоджується із законом Кірхгофа.

## 5. ДРУГИЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМІКИ

### 5.1. Основні визначення

Постулат Клаузіуса. Тепло не може самодовільно переходити від холодного тіла до горячого.

Постулат Томсона. Процес, єдиним результатом якого є перетворення теплоти в роботу, неможливий.

Постулат Планка. Будь-яка форма енергії може цілком перетворюватись в теплоту, але теплота перетворюється в інші форми енергії лише частково.

Постулат Оствальда. Неможливо створити вічний двигун другого роду, тобто машину, яка перетворювала б усе підведене тепло в роботу.

Ентропія – функція стану системи, повний диференціал якої ( $dS$ ) при елементарнім рівноважному процесі дорівнює відношенню нескінченно малої кількості теплоти ( $\delta Q$ ) до абсолютної температури (T) системи:

$$dS = \frac{\delta Q}{T}.$$

Для нерівноважного (необоротного) процесу диференціал ентропії

$$dS > \frac{\delta Q}{T}.$$

В ізольованих та адіабатних системах самодовільно можуть здійснюватись тільки ті процеси, при яких ентропія системи зростає ( $dS > 0$ ).

### 5.2. Основні формули для розрахунку ентропії речовин і зміни ентропії системи при процесах

#### 5.2.1. Абсолютна ентропія речовини:

$$S_T^\circ = \int_0^T \frac{C_p dT}{T};$$

#### 5.2.2. Ентропія речовини при температурі T:

##### 5.2.2.1.

$$S_T^\circ = S_{298}^\circ + 2,3R \lg \frac{T}{298} + \beta(T-298) + \frac{C}{2}(T^2-298^2) + \frac{C'(T^2-298^2)}{2 \cdot T^2 \cdot 298^2};$$

##### 5.2.2.2.

$$S_T^\circ = \frac{(H_T^\circ - H_0^\circ)}{T} + \left( - \frac{G_T^\circ - H_0^\circ}{T} \right).$$

5.2.3. Абсолютна ентропія речовини з врахуванням фазових перетворень і зміни ентропії при розширенні або стисненні газу від рівноважного тиску до  $1,013 \cdot 10^5$  Па:

$$S_T^\circ = \sum \int_0^T \frac{C_p dT}{T} + \sum \frac{\Delta H_{\text{Ф.п.}}}{T_{\text{Ф.п.}}} - 2,3R \lg \frac{P_2}{P_1}.$$

5.2.4. Зміна ентропії в процесах ідеальних газів:

5.2.4.1. при ізохоричному поглинанні тепла ( $V=\text{const}$ )

$$\Delta S_V = 2,3nC_V \cdot \lg \frac{T_2}{T_1} = 2,3nC_V \cdot \lg \frac{P_2}{P_1} = 2,3nC_p \cdot \lg \frac{T_2}{T_1} - 2,3nR \cdot \lg \frac{P_2}{P_1};$$

5.2.4.2. при ізобаричному поглинанні тепла ( $P=\text{const}$ )

$$\Delta S_P = 2,3nC_p \cdot \lg \frac{T_2}{T_1} = 2,3nC_p \cdot \lg \frac{V_2}{V_1} = 2,3nC_V \cdot \lg \frac{T_2}{T_1} + 2,3nR \cdot \lg \frac{V_2}{V_1};$$

5.2.4.3. при ізотермичному розширенні (стисненні) ( $T=\text{const}$ )

$$\Delta S_T = 2,3nR \cdot \lg \frac{V_2}{V_1} = 2,3nR \cdot \lg \frac{P_1}{P_2};$$

5.2.4.4. при адіабатичному розширенні (стисненні) ( $Q=0$ )

$$\Delta S_{\text{адг.}} = 2,3nC_V \cdot \lg \frac{P_2 \cdot V_2}{P_1 \cdot V_1} = 2,3n(C_V \cdot \lg \frac{P_2}{P_1} + C_p \cdot \lg \frac{V_2}{V_1});$$

5.2.4.5. при дифузійному змішуванні двох газів ( $P, T=\text{const}$ )

$$\Delta S = 2,3R(n_1 \cdot \lg \frac{V}{V_1} + n_2 \cdot \lg \frac{V}{V_2}), \text{ якщо } V = V_1 + V_2.$$

5.2.5. Зміна ентропії при фазових перетвореннях:

$$\Delta S_{\text{Ф.п.}} = \frac{\Delta H_{\text{Ф.п.}}}{T_{\text{Ф.п.}}}.$$

5.2.6. Зміна ентропії при хімічних реакціях:

$$5.2.6.1. \Delta S_T^\circ = \sum_i^i (n_i \cdot S_T^\circ)_{\text{Кінц.}} - \sum_i^i (n_i \cdot S_T^\circ)_{\text{Вих.}}$$

$$5.2.6.2. \Delta S_{T_2}^\circ = \Delta S_{T_1}^\circ + \int_{T_1}^{T_2} \frac{\Delta C_p dT}{T};$$

5.2.6.3.

$$\sqrt{\Delta S_T^\circ} = \Delta S_{298}^\circ + 2,3\Delta a \cdot \lg \frac{T}{298} + \Delta \beta(T-298) + \frac{\Delta C}{2}(T^2-298^2) + \frac{\Delta C'(T^2-298^2)}{2 \cdot T^2 \cdot 298^2};$$

$$\checkmark 5.2.6.4. \Delta S_T^\circ = \frac{\Delta(H_T^\circ - H_0^\circ)}{T} + \Delta \left( -\frac{G_T^\circ - H_0^\circ}{T} \right).$$

5.2.7. Зміна ентропії хімічної реакції з врахуванням фазових перетворень та змінювання ентропії при розширенні (стисненні) газу від рівноважного тиску до  $1,013 \cdot 10^5$  Па:

$$\Delta S_T^\circ = \sum \int_0^T \frac{\Delta C_p dT}{T} + \sum \frac{\Delta H_{\text{Ф.п.}}}{T_{\text{Ф.п.}}} - 2,3R \cdot \lg \frac{P_2}{P_1}.$$

5.3. Розв'язання типових задач

5.3.1. Знайдіть ентропію  $\text{AgCl}$  при 900 К. Температура плавлення  $\text{AgCl}=725$  К;  $\Delta H_{\text{пл.}} = 12,96$  кДж/моль;  $C_p, \text{AgCl}(\text{рід}) = 66,90$  Дж/моль·К;  $C_p, \text{AgCl}(\text{р.}) = 62,26 + 4,18 \cdot 10^{-3} \cdot T - 11,30 \cdot 10^5 \cdot T^{-2}$  Дж/моль·К;  $S_{298, \text{AgCl}}^\circ = 96,23$  Дж/моль·К.

Розв'язання. Ентропія хлориду срібла при 900 К складається із стандартної ентропії, зміни ентропії при нагріванні твердого хлориду срібла від 298 К до температури плавлення, зміни ентропії при фазовому перетворенні та зміни ентропії при нагріванні рідкого  $\text{AgCl}$  від температури плавлення до 900 К.

Розрахунок ентропії  $\text{AgCl}$  проведемо по рівнянні:

$$\begin{aligned} S_{900}^\circ &= S_{298}^\circ + \int_{298}^{725} \frac{C_p(\text{р.}) dT}{T} + \frac{\Delta H_{\text{пл.}}}{T_{\text{пл.}}} + \int_{725}^{900} \frac{C_p(\text{рід}) dT}{T} = \\ &= 96,23 + 2,3 \cdot 62,26 \cdot \lg \frac{725}{298} + 4,18 \cdot 10^{-3} (725-298) - \frac{11,30 \cdot 10^5 (725^2 - 298^2)}{2 \cdot 725^2 \cdot 298^2} + \\ &+ \frac{12,96 \cdot 10^3}{725} + 2,3 \cdot 66,90 \cdot \lg \frac{900}{725} = 174,89 \text{ Дж/моль·К.} \end{aligned}$$

5.3.2. Розрахуйте зміну ентропії при випаровуванні 3,6 кг води. Параметри води:  $P=1,013 \cdot 10^5$  Па,  $T=273$  К.

Параметри водяної пари:  $P=0,506 \cdot 10^5$  Па,  $T=373$  К.

Прийміть, що  $C_V=C_p=4,2$  кДж/кг·К, а питома теплота випаровування 2261 кДж/кг. Пари води вважайте ідеальним газом.

Розв'язання. Процес складається із слідучих стадій:

1) нагрівання води при  $P_1=1,013 \cdot 10^5$  Па від  $T_1=273$  К до  $T_2=373$  К;

2) перетворення води в пару при  $P_1=1,013 \cdot 10^5$  Па та  $T_2=373$  К;

3) ізотермічного розширення водяної пари при  $373$  К від  $P_1=1,013 \cdot 10^5$  Па до  $P_2=0,506 \cdot 10^5$  Па.

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 + \Delta S_3 = m C_p \cdot 2,3 \lg \frac{T_2}{T_1} + m \frac{\Delta H_{\text{випн}}}{T_{\text{випн}}} + n R \cdot 2,3 \lg \frac{P_1}{P_2} =$$

$$= 3,6 \cdot 4,2 \cdot 10^3 \cdot 2,3 \lg \frac{373}{273} + \frac{3,6 \cdot 2261 \cdot 10^3}{373} + \frac{3,6 \cdot 8,31 \cdot 2,3}{18 \cdot 10^{-3}} \cdot \lg \frac{1,013 \cdot 10^5}{0,506 \cdot 10^5} = 277 \text{ кДж/К}$$

5.3.3. Знайдіть зміну ентропії реакції



при 1000 К. Розрахунки виконайте за допомогою табличних значень тепловмісту та приведеної енергії Гіббса реагуючих речовин.

Розв'язання. Розрахунок проведемо по рівнянню:

$$\Delta S_{1000}^\circ = \frac{\Delta(H_{1000}^\circ - H_0^\circ)}{1000} + \Delta \left( -\frac{G_{1000}^\circ - H_0^\circ}{T} \right).$$

$$\Delta(H_{1000}^\circ - H_0^\circ) = (H_{1000}^\circ - H_0^\circ)_{\text{CO}_2} + 2(H_{1000}^\circ - H_0^\circ)_{\text{H}_2} - (H_{1000}^\circ - H_0^\circ)_c - 2(H_{1000}^\circ - H_0^\circ)_{\text{H}_2\text{O}_{\text{г.}}} =$$

$$= 42,76 + 2 \cdot 29,16 - 12,83 - 2 \cdot 35,95 = 16,35 \text{ кДж/моль.}$$

$$\Delta \left( -\frac{G_{1000}^\circ - H_0^\circ}{T} \right) = \left( -\frac{G_{1000}^\circ - H_0^\circ}{T} \right)_{\text{CO}_2} + 2 \left( -\frac{G_{1000}^\circ - H_0^\circ}{T} \right)_{\text{H}_2} - \left( -\frac{G_{1000}^\circ - H_0^\circ}{T} \right)_c - 2 \left( -\frac{G_{1000}^\circ - H_0^\circ}{T} \right)_{\text{H}_2\text{O}_{\text{г.}}} =$$

$$= 226,41 + 2 \cdot 136,96 - 11,64 - 2 \cdot 196,74 = 95,21 \text{ Дж/моль.К.}$$

$$\Delta S_{1000}^\circ = \frac{16,35 \cdot 10^3}{10^3} + 95,21 = 111,56 \text{ Дж/моль.К.}$$

5.4. Задачі для практичних занять та самостійної роботи

5.4.1. Знайдіть ентропію 1 моля заліза при 298,600 та 1000 К. Накресліть графік залежності  $S^\circ = f(T)$  та зробіть висновок про вплив температури на ентропію речовини. Температура плавлення заліза 1812 К.

5.4.2. Розрахуйте ентропію 1 моля алюмінію при 800 та 1000 К за допомогою температурних рядів теплоємкості. Температура плавлення алюмінію 932 К, теплота плавлення 10,80 кДж/моль.

5.4.3. Визначте зміну ентропії при нагріванні 6,54 кг цинку від 298 до 1000 К. Температура плавлення цинку 693 К, теплота плавлення 7,28 кДж/моль. Розрахунки виконайте за допомогою температурних рядів теплоємкості.

5.4.4. Знайдіть зміну ентропії при нагріванні 6,54 кг цинку від 298 до 1000 К. Температура плавлення 693 К, теплота плавлення 7,28 кДж/моль. Розрахунки виконайте за допомогою табличних значень тепловмісту та приведеної енергії Гіббса.

5.4.5. Розрахуйте зміну ентропії при нагріванні 32 кг кисню від 273 до 373 К при сталому тиску. Вважайте кисень ідеальним газом.

5.4.6. Розрахуйте зміну ентропії при нагріванні 32 кг кисню від 273 до 373 К при сталому об'ємі. Вважайте кисень ідеальним газом.

5.4.7. Знайдіть зміну ентропії в процесі ізотермічного розширення 2 кг водню від  $P_1 = 10,13 \cdot 10^5$  Па до  $P_2 = 1,013 \cdot 10^5$  Па. Вважайте водень ідеальним газом.

5.4.8. Розрахуйте зміну ентропії, якщо  $1,12 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$  азоту нагрівають від 0 до  $50^\circ\text{C}$ . При цьому тиск змінюється від  $1,013 \cdot 10^5$  до  $1,013 \cdot 10^3$  Па. Теплоємкість азоту 29,12 Дж/моль·К. Газ вважайте ідеальним.

5.4.9. Розрахуйте зміну ентропії в процесі змішування 9 кг води при  $350^\circ\text{C}$  з 18 кг води при  $280^\circ\text{C}$ . Теплоємкість води вважайте сталовою величиною, яка дорівнює 25,3 Дж/моль·К.

5.4.10. Розрахуйте зміну ентропії в процесі змішування 1 моля аргону, взятого при  $T = 293$  К та  $P = 1,013 \cdot 10^5$  Па, з 2 молями азоту при  $T = 273$  К та  $P = 1,013 \cdot 10^5$  Па. Тиск суміші дорівнює  $1,013 \cdot 10^5$  Па. Ізохорна теплоємкість газів стала величина, що дорівнює 20,78 та 20,81 Дж/моль·К відповідно. Гази вважайте ідеальними.

5.4.11. В одній посудині ємкості 200 л знаходиться водень, у другій посудині ємкості 0,6 м<sup>3</sup> – азот. В обох посудинах  $T = 27^\circ\text{C}$  та  $P = 1,013 \cdot 10^5$  Па. Знайдіть зміну ентропії при взаємній дифузії газів з однієї посудини до іншої при  $P, T = \text{const}$ . Гази – ідеальні.

5.4.12. Розрахуйте зміну ентропії при плавленні 6,35 кг міді. Температура плавлення міді  $1083^\circ\text{C}$ , питома теплота плавлення 204,4 кДж/кг.

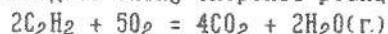
5.4.13. Розрахуйте зміну ентропії реакції  
 $\text{Fe}_3\text{O}_4 + 4\text{CO} = 3\text{Fe} + 4\text{CO}_2$   
 при 298 К та тиску  $1,013 \cdot 10^5$  Па.

5.4.14. Розрахуйте зміну ентропії реакції



при 1000 К та тиску  $1,013 \cdot 10^5$  Па. При розрахунках використуйте температурні ряди теплоємкості реагуючих речовин. Зробіть висновок про можливість самодовільної течії процесу при 298 та 1000 К.

5.4.15. Знайдіть зміну ентропії реакції



при 1000 К та тиску  $1,013 \cdot 10^5$  Па. Розрахунки виконайте за допомогою табличних значень тепловмісту та приведеної енергії Гіббса реагуючих речовин, зробіть висновок про можливість самодовільної течії процесу при заданих температурах.

5.5. Завдання для самостійної роботи (домашні завдання)

5.5.1. Для запропонованої реакції розрахуйте  $\Delta S_{298}^\circ$  по стандартним ентропіям реагуючих речовин.

5.5.2. Для запропонованої реакції розрахуйте  $\Delta S_T^\circ$ :

5.5.2.1. по температурним рядам теплоємкості реагуючих речовин;

5.5.2.2. по значенням тепловмісту та приведеної енергії Гіббса реагуючих речовин.

Порівняйте результати. Зробіть висновок про можливість самодовільної течії процесу при 298 К та заданій температурі.

5.5.3. Для запропонованої реакції розрахуйте по рівнянням 5.2.6.3 зміну ентропії для чотирьох-семи температур. Накресліть графік залежності  $\Delta S^\circ = f(T)$  та установіть, як зміна температури впливає на зміну ентропії реакції.

## 6. ТЕРМОДИНАМІЧНІ ПОТЕНЦІАЛИ. ХІМІЧНА СПОРІДНЕНІСТЬ

### 6.1. Основні визначення

Термодинамічний потенціал – характеристична функція стану системи, зменшення якої в результаті процесу дорівнює максимальній корисній роботі цього процесу за умовах незмінності певної пари параметрів. Це деяка енергія системи, що при самодовільному процесі зменшується та досягає мінімуму в момент рівноваги.

Ізобарно-ізотермічний термодинамічний потенціал (енергія Гіббса) позначається символом  $G$  ( $P, T = \text{const}$ ).

$$G_2 - G_1 = \Delta G = -W_{P,T, \text{МАКС.}}$$

Ізокорно-ізотермічний термодинамічний потенціал (енергія Гельмольца) позначається символом  $F$  ( $V, T = \text{const}$ ).

$$F_2 - F_1 = \Delta F = -W_{V,T, \text{МАКС.}}$$

Хімічна спорідненість ( $\Delta G$ ) – умовна назва здатності речовин вступати в хімічну взаємодію між собою. При самодовільному процесі  $\Delta G < 0$ . Хімічна спорідненість має місце.

### 6.2. Основні формули для розрахунку

#### 6.2.1. При стисненні (розширенні) ідеальних газів ( $T = \text{const}$ )

$$\Delta G = 2,3 nRT \cdot \lg \frac{P_2}{P_1} = 2,3 nRT \lg \frac{V_1}{V_2}.$$

#### 6.2.2. Для кондинсованих систем при помірному тиску

$$\Delta G = V_{K\Phi.} (P_2 - P_1).$$

#### 6.2.3. Для фазових перетворень

$$\Delta G_{\text{Ф.п.}} = 0.$$

#### 6.2.4. Для хімічних реакцій:

$$6.2.4.1. \Delta G_T = 2,3 RT (\Delta \lg P_{0,i} - \lg K_p);$$

$$6.2.4.2. \Delta G_T^\circ = -2,3 RT \lg K_p;$$

$$6.2.4.3. \Delta G_T^\circ = \Delta H_T^\circ - T \Delta S_T^\circ;$$

$$6.2.4.4. \Delta G_T^\circ = \Delta G_T^\circ + 2,3 RT \Delta \lg P_{0,i};$$

$$6.2.4.5. \Delta G_{298}^\circ = \sum_i^i (n_i \Delta G_{f,298}^\circ)_{\text{кінц.}} - \sum_i^i (n_i \Delta G_{f,298}^\circ)_{\text{вих.}}$$

$$6.2.4.6. \Delta G_{298}^\circ = \pm m \cdot \Delta G_{298, I}^\circ \pm n \cdot \Delta G_{298, II}^\circ \pm \dots,$$

$$\text{якщо } X = \pm m \cdot I \pm n \cdot II \pm \dots;$$

$$6.2.4.7. \Delta G_T^\circ = \Delta H_{298}^\circ - T \Delta S_{298}^\circ - T(\Delta Q \cdot M_0 + \Delta \delta M_1 + \Delta CM_2 + \Delta C' M_{-2});$$

$$6.2.4.8. \Delta G_T^\circ = \Delta H_{298}^\circ - T \Delta S_{298}^\circ - T \Delta C_p \cdot M_0, [C_p \neq f(T)];$$

$$6.2.4.9. \Delta G_T^\circ = \Delta H_{298}^\circ - T \Delta S_{298}^\circ, (\Delta C_p = 0);$$

$$6.2.4.10. \Delta G_T^\circ = \Delta H_{298}^\circ - A(H_{298}^\circ - H_0^\circ) - T \cdot A \left( \frac{G_T^\circ - H_0^\circ}{T} \right);$$

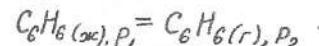
$$6.2.4.11. \Delta G_T^\circ = \Delta H_T^\circ - T \cdot \Delta \left( \frac{G_T^\circ - H_T^\circ}{T} \right);$$

$$6.2.4.12. \Delta G_T^\circ = -nFE_T^\circ;$$

$$6.2.4.13. \Delta G_T^\circ = \Delta F_T^\circ + \Delta nRT.$$

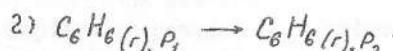
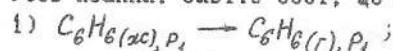
### 6.3. Розв'язання типових задач

6.3.1. Розрахуйте зміну енергії Гіббса для 780 г бензолу при ізотермічному процесі:



При цьому тиск знижується з  $1,013 \cdot 10^5$  Па до  $0,506 \cdot 10^5$  Па. Нормальна температура кипіння бензолу 353 К.

Розв'язання. Уявіть собі, що процес іде в дві стадії:

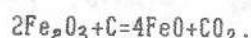


Так як  $\Delta G$  не залежить від шляху процесу, то  $\Delta G = \Delta G_1 + \Delta G_2$ ,  $dG = VdP - SdT$ . В першій стадії P та T не змінюються, через це  $\Delta G_1 = 0$ . У другій стадії не змінюється температура. Звідси  $dG = VdP$ . Прийнявши, що пари бензолу - ідеальний газ, і зробивши заміну  $V = RT/P$ , отримаємо рівняння

$$\Delta G = \Delta G_2 = \int_{P_1}^{P_2} nRT \frac{dP}{P} = nRT \cdot 2,3 \cdot \lg \frac{P_2}{P_1}$$

$$\Delta G = \frac{780 \cdot 10^{-3} \cdot 8,31 \cdot 353 \cdot 2,3}{78 \cdot 10^{-3}} \lg \frac{0,506 \cdot 10^5}{1,013 \cdot 10^5} = -22,24 \text{ кДж.}$$

6.3.2. Розрахуйте стандартну хімічну спорідненість речовин в реакції



Установіть можливість самодовільної течії реакції при 298 К та  $P=1,013 \cdot 10^5$  Па.

Розв'язання. Хімічну спорідненість речовин розрахуємо по рівнянню

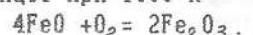
$$\Delta G_{298}^\circ = \sum_i^i (n_i \Delta G_{f,298}^\circ)_{\text{кін.}} - \sum_i^i (n_i \Delta G_{f,298}^\circ)_{\text{вих.}}$$

$$\Delta G_{298}^\circ = 4 \Delta G_{f,298, FeO}^\circ + \Delta G_{f,298, CO_2}^\circ - 2 \Delta G_{f,298, Fe_2O_3}^\circ - \Delta G_{f,298, C}^\circ =$$

$$= 4(-244,30) + (-394,37) - 2(-740,34) = 109,11 \text{ кДж.}$$

Так як  $\Delta G_{298} > 0$ , то даний процес самодовільно за стандартних умов не протікає.

6.3.3. Розрахуйте стандартний ізобарний термодинамічний потенціал реакції при 1000 К



Установіть можливість самодовільної течії реакції при 1000 К та  $P=1,013 \cdot 10^5$  Па.

Розв'язання. Розрахунок проведемо по рівнянню Тьюміна-Шварцмана

$$\Delta G_T^\circ = \Delta H_{298}^\circ - T \Delta S_{298}^\circ - T (\Delta a M_0 + \Delta b M_1 + \Delta c M_2 + \Delta c' M_3).$$

Для вивченої реакції

$$\Delta H_{298}^\circ = 2 \Delta H_{f,298, Fe_2O_3}^\circ - 4 \Delta H_{f,298, FeO}^\circ - \Delta H_{f,298, O_2}^\circ = \\ = 2(-822,16) - 4(-264,85) - 0,0 = -584,92 \text{ кДж.}$$

$$\Delta S_{298}^\circ = 2 S_{298, Fe_2O_3}^\circ - 4 S_{298, FeO}^\circ - S_{298, O_2}^\circ = 2 \cdot 87,45 - 4 \cdot 60,75 - 205,04 = -273,14 \text{ Дж/К.}$$

$$\Delta a = 2 a_{Fe_2O_3} - 4 a_{FeO} - a_{O_2} = 2 \cdot 97,74 - 4 \cdot 50,80 - 31,46 = -39,18 \text{ Дж/К.}$$

$$\Delta b = 2 b_{Fe_2O_3} - 4 b_{FeO} - b_{O_2} = (2 \cdot 72,13 - 4 \cdot 8,61 - 3,39) \cdot 10^{-3} = \\ = 106,43 \cdot 10^{-3} \text{ Дж/К}^2.$$

$$\Delta c' = 2 c'_{Fe_2O_3} - 4 c'_{FeO} - c'_{O_2} = [2 \cdot (-12,89) - 4 \cdot (-3,31) - (-3,22)] \cdot 10^{-5} = \\ = -8,77 \cdot 10^{-5} \text{ Дж/К.}$$

Для температури 1000 К  $M_0 = 0,509$ ;  $M_1 = 0,246 \cdot 10^3$ ,  $M_2 = 0,278 \cdot 10^{-5}$ .

Підставимо розраховані дані в рівняння Тьюміна-Шварцмана:

$$\Delta G_{1000}^\circ = -584920 - 1000 \cdot (-273,14) - 1000 [(-39,18) \cdot 0,509 + 106,43 \cdot 10^{-3} \cdot 0,246 \times \\ \times 10^3 + (-8,77) \cdot 10^{-5} \cdot 0,278 \cdot 10^{-5}] = -315,58 \text{ кДж.}$$

Так як  $\Delta G_{1000}^\circ < 0$ , то дана реакція при 1000 К та  $P=1,013 \cdot 10^5$  Па протікає самодовільно.

#### 6.4. Задачі для практичних занять та самостійної роботи

6.4.1. Розрахуйте зміну енергії Гіббса при стисненні 2,8 кг азоту при 300 К від  $1,013 \cdot 10^5$  до  $5,065 \cdot 10^5$  Па. Вважайте азот ідеальним газом.

6.4.2. Знайдіть зміну ізобарного термодинамічного потенціалу при стисненні 1 кмоль рідкого толуолу ( $C_6H_5CH_3$ ) від  $1,013 \cdot 10^5$  до  $1013 \cdot 10^5$  Па при 298 К. Стисливість рідини в цьому інтервалі тиску можете знаважати ( $V = \text{const}$ ). Густина толуолу 867 кг/м<sup>3</sup>.

6.4.3. При 300 К змінили 2 моля водню та 3 моля азоту. Вихідний тиск кожного газу та тиск суміші одинаковий і дорівнює  $1,013 \cdot 10^5$  Па. Розрахуйте зміну енергії Гіббса. Гази вважайте ідеальними.

6.4.4. Розрахуйте зміну енергії Гіббса для 1 моля оксида вуглеця ( $\text{IV}$ ) в процесі ізобаричного ( $P=1,013 \cdot 10^5$  Па) нагрівання від 298 до 500 К, якщо  $C_p = \text{const}$ .

6.4.5. Знайдіть зміну енергії Гіббса для 1 моля оксида вуглеця ( $\text{IV}$ ) в процесі ізобаричного ( $P=1,013 \cdot 10^5$  Па) нагрівання від 298 до 500 К, якщо  $C_p = f(T)$ .

6.4.6. Для реакції  $C_2H_4 + 3O_2 = 2CO_2 + 2H_2O$  розрахуйте хімічну спорідненість при 298 К по стандартним ізобарним потенціалам утворення реагуючих речовин.

6.4.7. Для реакції  $C_2H_4 + 3O_2 = 2CO_2 + 2H_2O$  розрахуйте хімічну спорідненість при 298 К шляхом алгебраїчного підсумування рівнянь допоміжних реакцій  $\Delta G_{298}^\circ$  яких відомі. Зробіть висновок про можливість самодовільної течії реакції при 298 К та  $P=1,013 \cdot 10^5$  Па.

6.4.8. Знайдіть стандартну зміну енергії Гіббса при 298 К для реакції  $Fe_2O_3 + 3CO = 2Fe + 3CO_2$ .

Розрахунки виконайте за допомогою стандартних ізобарно-ізотермічних потенціалів утворення реагуючих речовин та рівняння Гіббса-Гельмгольца. Порівняйте результати. Зробіть висновок про можливість самодовільної течії процесу в заданих умовах.

6.4.9. Для реакції  $C_2H_4 + 3O_2 = 2CO_2 + 2H_2O$  розрахуйте зміну стандартного ізобарно-ізотермічного потенціала при 600 К по рівнянню Тьюмкіна-Шварцмана.

Визначте, чи буде ця реакція проходити самодовільно при заданих умовах.

6.4.10. Для реакції  $C_2H_4 + 3O_2 = 2CO_2 + 2H_2O$  розрахуйте зміну стандартної енергії Гіббса при 600 К за допомогою табличних значень тепловмісту та приведеної енергії Гіббса реагуючих речовин. Визначте можливість самодовільної течії цієї реакції при заданих умовах.

6.4.11. Електрорушійна сила електрохімічного елементу, в якому протікає реакція  $Pb + Cl_2 = PbCl_2$ , дорівнює 1,2 В при 298 К та  $P=1,013 \cdot 10^5$  Па. Розрахуйте зміну стандартної енергії Гіббса та стандартної енергії Гельмгольца для даної реакції.

6.4.12. Докажіть розрахунками, чи можливо отримати етиловий спирт при взаємодії етилену та води за стандартних умов.

6.4.13. Докажіть розрахунками, чи можлива взаємодія між воднем та киснем в стандартних умовах. Поясніть, чому протікає цей процес.

6.4.14. Для відновлення заліза із оксида заліза (ІІ) можна використати марганець або цинк. Докажіть розрахунками, який елемент є більш ефективним відновником.

6.4.15. Для реакції  $CO + H_2O = CO_2 + H_2$ , яка протікає в газовій фазі, стандартна хімічна спорідненість при 298 К дорівнює -28,6 кДж. Розрахуйте  $\Delta G_{298}^\circ$  при умові, що вихідний парціальний тиск  $CO$ ,  $H_2O$ ,  $CO_2$  і  $H_2$  відповідно дорівнюють 2;1;0,2 і 0,2 атм.

#### 6.5. Завдання для самостійної роботи (домашні завдання)

6.5.1. Для запропонованої реакції розрахуйте  $\Delta G_{298}^\circ$ :

6.5.1.1. по стандартним ізобарним потенціалам утворення реагуючих речовин;

6.5.1.2. шляхом алгебраїчного підсумування рівнянь допоміжних реакцій,  $\Delta G_{298}^\circ$  яких відомі.

Порівняйте результати. Зробіть висновок про можливість самодовільної течії процесу за стандартних умов.

6.5.2. Для запропонованої реакції розрахуйте  $\Delta G_T^\circ$ :

6.5.2.1. по рівнянню Тьюмкіна-Шварцмана;

6.5.2.2. по значенням тепловмісту та приведеної енергії Гіббса реагуючих речовин.

Порівняйте одержані результати. Зробіть висновок про можливість самодовільної течії процесу при даній температурі.

6.5.3. Для запропонованої реакції розрахуйте по двочленній формулі Чліха значення  $\Delta G_T^\circ$  для чотирьох-семи температур. Накресліть графік залежності  $\Delta G^\circ = f(T)$  та установіть вплив зміни температури на величину стандартного ізобарного потенціалу реакції. Зробіть висновок про оптимальну температуру, при якій треба вести процес.

## 7. ХІМІЧНА РІВНОВАГА. КОНСТАНТА РІВНОВАГИ

### 7.1. Основні визначення

При сталій температурі добуток рівноважних числових характеристик продуктів реакції в степенях, відповідаючих їх стехіометричним коефіцієнтам в рівнянні реакції, поділений на добуток рівноважних числових характеристик вихідних речовин в степенях, відповідаючих їх стехіометричним коефіцієнтам, є величина стала і називається термодинамічною константою хімічної рівноваги.

Для реакції  $aA + bB = dD + eE$

$$K = \frac{[D]_{\text{рівн.}}^d [E]_{\text{рівн.}}^e}{[A]_{\text{рівн.}}^a [B]_{\text{рівн.}}^b}.$$

Числові характеристики – це парціальний тиск ( $P_i$ ), концентрація ( $C_i$ ), молярна доля ( $X_i$ ) і об'ємні проценти ( $\%V$ ) реагуючих речовин.

Співвідношення між  $K_p$ ,  $K_c$ ,  $K_x$  та  $K\%V$  визначається рівнянням:

$$K_p = K_c (RT)^{\Delta n} = K_x (P_{\text{заг.}})^{\Delta n} = K\%V \left( \frac{P_{\text{заг.}}}{100} \right)^{\Delta n}.$$

Якщо  $K_p > 1$ , то рівновага хімічної реакції зрушується в бік продуктів.

### 7.2. Основні формули для розрахунку константи рівноваги

$$7.2.1. \lg K_{p,T} = -\frac{\Delta G^\circ_T}{2,3 R T};$$

$$7.2.2. \lg K_{p,298} = -\frac{\Delta G^\circ_{298}}{2,3 R \cdot 298} = -\frac{\Delta(\Delta G^\circ_{T,298})}{2,3 R \cdot 298};$$

$$7.2.3. \lg K_{p,T_2} = \lg K_{p,T_1} + \frac{\Delta H^\circ_{T_1+T_2}(T_2-T_1)}{2,3 \cdot R \cdot T_1 \cdot T_2},$$

$$7.2.4. \lg K_{p,T} = -\frac{\Delta H^\circ_{298}}{2,3 R T} + \frac{3,5 \Delta n}{R} \lg T + \Delta i;$$

$$7.2.5. \lg K_{p,T} = -\frac{\Delta H^\circ_{298}}{2,3 R T} + \frac{\Delta S^\circ_{298}}{2,3 R} + \frac{1}{2,3 R} (\Delta a M_o + \Delta b M_i + \Delta c M_2 + \Delta c' M_{-2});$$

$$7.2.6. \lg K_{p,T} = -\frac{\Delta H^\circ_{298}}{2,3 R T} + \frac{\Delta S^\circ_{298}}{2,3 R} + \frac{\Delta C_p \cdot M_o}{2,3 R}, \quad [C_p \neq f(T)];$$

$$7.2.7. \lg K_{p,T} = -\frac{\Delta H^\circ_{298}}{2,3 R T} + \frac{\Delta S^\circ_{298}}{2,3 R}, \quad (\Delta C_p = 0);$$

$$7.2.8. \lg K_{p,T} = -\frac{\Delta H^\circ_{298}}{2,3 R T} + \frac{1}{2,3 R} \Delta \left( -\frac{G^\circ_T - H^\circ_o}{T} \right) + \frac{\Delta(H^\circ_{298} - H^\circ_o)}{2,3 R T};$$

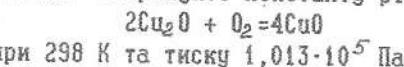
$$7.2.9. \lg K_{p,T} = -\frac{\Delta H^\circ_o}{2,3 R T} + \frac{1}{2,3 R} \Delta \left( -\frac{G^\circ_T - H^\circ_o}{T} \right);$$

$$7.2.10. \lg K_{p,T,x} = \pm m \lg K_{p,T,I} \pm n \lg K_{p,T,II} \pm \dots, \\ \text{якщо } x = \pm m \cdot I \pm n \cdot II \pm \dots;$$

$$7.2.11. \frac{d \ln K_p}{dT} = \frac{\Delta H^\circ_T}{R T^2}.$$

### 7.3. Розв'язання типових задач

#### 7.3.1. Розрахуйте константу рівноваги реакції



Розв'язання. Для розрахунку константи рівноваги використуємо рівняння

$$\lg K_{p,298} = -\frac{\Delta G^\circ_{298}}{2,3 \cdot R \cdot T}.$$

Стандартну хімічну спорідненість можна знайти з рівняння

$$\Delta G^\circ_{298} = \sum_i (n_i \Delta G^\circ_{f,298})_{\text{кін.}} - \sum_i (n_i \Delta G^\circ_{f,298})_{\text{вих.}}$$

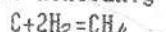
$$\Delta G^\circ_{298} = 4 \Delta G^\circ_{f,298, \text{CuO}} - 2 \Delta G^\circ_{f,298, \text{Cu}_2\text{O}} = 4(-134,26) - 2(-150,56) = -235,92 \text{ kJ}\text{дж}$$

$$\lg K_{p,298} = -\frac{-235,92 \cdot 10^3}{2,3 \cdot 8,31 \cdot 298} = 41,4$$

$$K_{p,298} = 2,51 \cdot 10^{41}.$$

Так як  $K_p > 1$ , то реакція протікає в прямому напрямку.

### 7.3.2. Розрахуйте константу рівноваги реакції



при 400 К, якщо при 300 К  $K_p = 9$ , а середнє значення теплового ефекту реакції в цьому діапазоні температур дорівнює -75 кДж.

Розв'язання. Розрахуємо константу рівноваги при 400 К по рівнянню

$$\lg K_{P,T_2} = \lg K_{P,T_1} + \frac{\Delta H^\circ}{2,3 \cdot R \cdot T_2 \cdot T_1} (T_2 - T_1)$$

$$\lg K_{P,400} = \lg 9 + \frac{75 \cdot 10^3 (400 - 300)}{2,3 \cdot 8,31 \cdot 400 \cdot 300} = -2,32$$

$$K_{P,400} = 4,79 \cdot 10^{-3}$$

Так як  $K_p < 1$ , то реакція самодовільно у прямому напрямку не протикає.

7.3.3. Для реакції  $C_2H_4 + HCl \rightleftharpoons C_2H_5Cl$ , яка протикає у газовій фазі при 500 К,  $K_p = 1,28 \cdot 10^{-6} \text{ Па}^{-1}$ . Знайдіть склад рівноважної суміші (в об'ємних процентах), отриманої при тиску  $1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$  із 2 моля  $C_2H_4$  та 1 моля  $HCl$ .

Розв'язання. Позначимо через  $X$  число молей утвореного хлоретану. Так як на його утворення треба затратити по рівнянні хімічної реакції по  $X$  моля  $C_2H_4$  та  $HCl$ , то в рівноважній суміші залишиться  $(2-X)$  моль етилену та  $(1-X)$  моль  $HCl$ .

Тоді в рівноважній суміші число молей буде дорівнювати

$$\Sigma n = 2-X+1-X+X=3-X$$

Парціальні тиски компонентів суміші будуть дорівнювати

$$P_{C_2H_4} = \frac{2-X}{3-X} \cdot P_{\text{зар}}; \quad P_{HCl} = \frac{1-X}{3-X} \cdot P_{\text{зар}}; \quad P_{C_2H_5Cl} = \frac{X}{3-X} \cdot P_{\text{зар}}$$

$$K_p = \frac{P_{C_2H_5Cl}}{P_{C_2H_4} \cdot P_{HCl}} = \frac{(3-X) \cdot X}{(2-X)(1-X)} \cdot \frac{1}{1,013 \cdot 10^6} = 1,28 \cdot 10^{-6} \text{ Па}^{-1}$$

Після кількох математичних дій маємо квадратне рівняння

$$2,32X^2 - 6,98X + 2,64 = 0,$$

вирішивши яке, знайдемо  $X$ .

$$X_1 = 0,44 \text{ і } X_2 = 2,55.$$

Другий корінь не має фізичного змісту, так як  $X$  може буди тільки меншим одиниці. Через це в рівноважній суміші залишиться

0,44 моля  $C_2H_5Cl$ ,  $2-0,44=1,56$  молей  $C_2H_4$ ;  $1-0,44=0,56$  молей  $HCl$ . Склад суміші в об'ємних процентах буде дорівнювати:

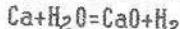
$$\Sigma n = 1,56 + 0,56 + 0,44 = 2,56;$$

$$\%V_{C_2H_4} = \frac{1,56}{2,56} \cdot 100 = 60,94\%; \quad \%V_{HCl} = \frac{0,56}{2,56} \cdot 100 = 21,88\%;$$

$$\%V_{C_2H_5Cl} = \frac{0,44}{2,56} \cdot 100 = 17,18\%.$$

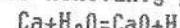
### 7.4. Задачі для практичних занять і самостійної роботи

#### 7.4.1. Розрахуйте константу рівноваги реакції



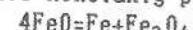
при 298 К за допомогою стандартних ізобарних потенціалів утворення реагуючих речовин.

#### 7.4.2. Знайдіть константу рівноваги реакції



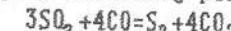
при 298 К за допомогою стандартних теплот утворення та ентропії реагуючих речовин.

#### 7.4.3. Розрахуйте константу рівноваги реакції



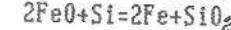
яка протикає за стандартних умов, мляком алгебраїчного підсумування рівнянь допоміжних реакцій, константи рівноваги яких відомі.

#### 7.4.4. Розрахуйте константу рівноваги реакції



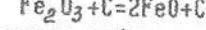
при 500 К за допомогою приблизного рівняння Нернста.

#### 7.4.5. Знайдіть константу рівноваги реакції



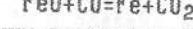
при 1000 К за допомогою рівняння Тьюмкіна-Шварцмана.

#### 7.4.6. Розрахуйте константу рівноваги реакції



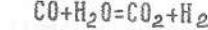
при 1000 К за допомогою таблиці значень тепловмісту та приведеної енергії Гіббса реагуючих речовин.

#### 7.4.7. Знайдіть константу рівноваги реакції



при 800 К по стандартним теплотам утворення (при  $T=0\text{K}$ ) та приведеної енергії Гіббса реагуючих речовин.

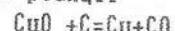
#### 7.4.8. Стандартний тепловий ефект реакції



яка протикає у газовій фазі при 298 К, дорівнює -41,12 кДж.

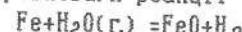
Докажіть за допомогою розрахунків, чи можна збільшенням температури зрушити рівновагу в бік збільшення виходу водню.

#### 7.4.9. Тепловий ефект реакції



при 298 К та  $P=1,013 \cdot 10^5$  Па дорівнює 51,5 кДж. Докажіть за допомогою розрахунків, чи можна збільшенням температури або тиску зрушити рівновагу в бік збільшення виходу металічної міді.

#### 7.4.10. Константа рівноваги-реакції

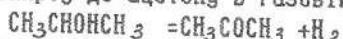


при 298 К дорівнює 2,8. Знайдіть вихід продуктів реакції (в %) при 298 К.

7.4.11. При температурі 1000 К та тиску  $1,013 \cdot 10^5$  Па константа рівноваги реакції  $\text{FeO} + \text{CO} = \text{Fe} + \text{CO}_2$  дорівнює 1,5. Розрахуйте, скільки заліза можна одержати при цій температурі, якщо для відмовлення 279 кг оксиду заліза (П) взяти 28 кг оксиду вуглеця (П). Чи збільшиться вихід продуктів при більш високій температурі, якщо тепловий ефект реакції дорівнює -18 кДж?

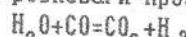
7.4.12. Пружність дисоціації карбонату кальцію при 1000 та 1200 К дорівнює відповідно  $2,7 \cdot 10^{-4}$  і  $1,4 \cdot 10^{-5}$  Па. Знайдіть середнє значення теплового ефекту реакції дисоціації в цьому інтервалі температур.

7.4.13. При 500 К константа рівноваги реакції дегідрування ізопропилового спирту до ацетону в газовій фазі



дорівнює  $7 \cdot 10^{-4}$  Па. Розрахуйте ступінь дисоціації спирту при 500 К та тиску  $10 \cdot 10^{-4}$  Па. Вважайте, що суміші газів підкоряється законам ідеальних газів.

7.4.14. Константа рівноваги процесу отримання водяного газу



при 1200 К дорівнює 1,5. Знайдіть, який склад повинна мати вихідна суміш, яка складається із водяної пари та оксиду вуглеця (П), щоб рівноважна суміш вміщувала (по об'єму) 20%  $\text{CO}_2$  і 20%  $\text{H}_2$ .

7.4.15. Константа рівноваги реакції  $\text{H}_2 + \text{I}_2 = 2\text{HI}$ , яка протікає в газовій фазі при 723 К, дорівнює 50. Розрахуйте вихід продуктів реакції та коефіцієнт використання йоду, якщо в вихідній суміші концентрація водню та йоду складає 0,05 та 0,1 моль/м<sup>3</sup>.

#### 7.5. Завдання для самостійної роботи (домашні завдання)

7.5.1. Для запропонованої реакції розрахуйте  $K_p,_{298}$ :

7.5.1.1. по стандартним ізобарним потенціалам утворення реагуючих речовин;

7.5.1.2. шляхом алгебраїчного підсумовування рівнянь допоміжних реакцій,  $\lg K_p$  яких відома.

Порівняйте отримані результати. Зробіть висновок про напрямок та глибину протікання реакції при 298 К.

7.5.2. Для запропонованої реакції розрахуйте  $K_p,_{T}$ :

7.5.2.1. по приблизному рівнянню Нернста;

7.5.2.2. по рівнянню Тьюмкіна-Шварцмана;

7.5.2.3. по табличним значенням тепловмісту та приведеної енергії Гіббса реагуючих речовин.

Порівняйте отримані результати. Зробіть висновок про напрямок реакції та глибину її протікання при даній температурі.

7.5.3. Для запропонованої реакції розрахуйте по двочленній формулі Уліха значення  $\lg K_p,_{T}$  для чотирьох-семи температур. Накресліть графік залежності  $\lg K_p=f(T)$  та установіть вплив зміни температури на величину константи рівноваги. Чи збігається отриманий результат з аналізом рівняння ізобари для вивченої реакції?

Зробіть висновок про оптимальну температуру, при якій краще вести процес.

7.5.4. Для запропонованої реакції при заданій температурі розрахуйте вихід продуктів (в %) при стандартному тиску в еквімолекулярній вихідній суміші. Величину  $K_p,_{T}$  розрахуйте будь-яким методом. Чи можливо збільшити вихід продуктів шляхом зміни температури або тиску?

Додаток

Таблиця Д.1

Фізичні величини Міжнародної системи (СІ), їх  
одиниці та позначення деяких фізичних величин

Назва	Величина		Одиниця	
	Рекомен- доване позначення	Розмірність	Наймену- вання	Українське позначення
1	2	3	4	5
Довжина	$\ell$		метр	м
Маса	$m$		кілограм	кг
Температура	$T$		кельвін	К
Кількість речовини	$n$		моль	моль
Площа	$S$		квадратний метр	$m^2$
Об'єм	$V$		кубічний метр	$m^3$
Тиск	$P$	$kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-2}$	паскаль	Па
Робота	$W$	$kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}$	дюоуль	Дж
Кількість теплоти	$Q$	"	"	"
Внутрішня енергія	$U$	"	"	"
Ентальпія	$H$	"	"	"
Термодинамічний потенціал: ізобарний	$G$	"	"	"
ізохорний	$F$	"	"	"
Теплоємкість: молярна	$C$	$kg \cdot m^2 \cdot s^{-2} \cdot mol^{-1} \cdot K$	дюоуль на моль-кельвін	Дж/моль·К
пітому	$C_{nuit.}$	$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K$	дюоуль на кілограм-кельвін	Дж/кг·К

Продовження табл.Д.1

1	2	3	4	5
Ентропія	$S$	$kg \cdot m^2 \cdot s^{-2} \cdot K$	дюоуль на кельвін	Дж/К
Молярна маса	$M$		кілограм на моль	кг/моль
Концентрація: молярна	$C_M$		моль на кубіч- ний метр	моль/м <sup>3</sup>
моляльна	$C_m$		моль на кіло- грам	моль/кг
нормальна	$C_N$		кілограм-екві- валент на кубічний метр	кг-екв/м <sup>3</sup>
молярна частка	$N$			
Константа рівноваги	$K$			
Коефіцієнти- рівняння	$C_p = f(T)$ :			
	$a$	$kg \cdot m^2 \cdot s^{-2} \cdot mol \cdot K$	дюоуль на моль- Кельвін	Дж/моль·К
	$b$	$kg \cdot m^2 \cdot s^{-2} \cdot mol \cdot K^2$	дюоуль на моль- Кельвін у квадраті	Дж/моль·К <sup>2</sup>
	$c$	$kg \cdot m^2 \cdot s^{-2} \cdot mol \cdot K^3$	дюоуль на моль- Кельвін у кубі	Дж/моль·К <sup>3</sup>
	$c'$	$kg \cdot m^2 \cdot K \cdot s^{-2} \cdot mol$	дюоуль-кельвін	Дж·К/моль
Стандартна теплота утворення речовини	$\Delta H_f^{\circ},_{298}$	$kg \cdot m^2 \cdot s^{-2} \cdot mol$	дюоуль на моль	Дж/моль
Теплота утворення речовини при $T=0 \text{ K}$	$\Delta H_f^{\circ},_0$	$kg \cdot m^2 \cdot s^{-2} \cdot mol$	дюоуль на моль	Дж/моль
Стандартна теплота згоряння речовини	$\Delta H_{zr}^{\circ},_{298}$	"	дюоуль на моль	Дж/моль

Продовження табл.Д.1

1	2	3	4	5
Стандартний тепловий ефект реакції	$\Delta H_{298}^{\circ}$	кг·м <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>	дюуль	Дж
Тепловміст речовини	$(H_T^{\circ} - H_c^{\circ})$	кг·м <sup>2</sup> /с <sup>2</sup> · моль	дюуль на моль	Дж/моль
Приведена енергія Гіббса	$(-\frac{G_T^{\circ} - H_c^{\circ}}{T})$	кг·м <sup>2</sup> /с <sup>2</sup> · моль·К	дюуль на моль	Дж/моль·К — кельвін
Стандартний ізобарний потенціал утворення речовини	$\Delta G_f^{\circ},_{298}$	кг·м <sup>2</sup> /с <sup>2</sup> · моль	дюуль на моль	Дж/моль
Стандартна хімічна спорідненість	$\Delta G_T^{\circ}$	кг·м <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>	дюуль	Дж
Стандартна ентропія	$S_{298}^{\circ}$	кг·м <sup>2</sup> /с <sup>2</sup> · моль·К	дюуль на моль	Дж/моль·К — кельвін
Стандартна молярна ізобарна теплоємкість	$C_{P,298}^{\circ}$	—	—	—
Теплота нагрівання речовини	$Q_{P,T_1+T_2}$	кг·м <sup>2</sup> /с <sup>2</sup>	дюуль	Дж
Температурні функції рівняння Тьюкіна-Шварциана:	$M_0$ $M_1$ $M_2$ $M_{-2}$	кельвін кельвін у квадраті одиниця на кельвін у квадраті	К К <sup>2</sup> К <sup>-2</sup>	

Таблиця Д.2

## Співвідношення між одиницями вимірювання фізичних величин

## Співвідношення між одиницями енергії

Одиниця	Еквівалент			
	у Дж	в ерг	у мікр.кал	в еВ
1 Дж	1	$10^7$	0,238846	$0,624146 \cdot 10^{19}$
1 мікр.кал.	$4,1868 \cdot 10^{-7}$	$4,1868 \cdot 10^7$	1	$2,58287 \cdot 10^{19}$
1 ерг	$10^{-7}$	1	$2,38846 \cdot 10^{-8}$	$0,624146 \cdot 10^{12}$
1 лати	101,3278	$1,013278 \cdot 10^9$	24,2017	$63,24333 \cdot 10^{19}$
1 кгс·м	9,80665	$9,80665 \cdot 10^7$	2,34227	$6,12078 \cdot 10^{19}$
1 кВт·г	$3,6 \cdot 10^6$	$3,6 \cdot 10^{13}$	$8,5985 \cdot 10^{-5}$	$2,24693 \cdot 10^{25}$
1 ев	$1,60219 \cdot 10^{-10}$	$1,60219 \cdot 10^{-10}$	$3,92677 \cdot 10^{-20}$	1

## Співвідношення між одиницями тиску

Одиниця	Еквівалент			
	у Па	у мм рт.ст.	у дін/см <sup>2</sup>	в ати.
1 Па	1	$0,750064 \cdot 10^{-2}$	10	$0,986923 \cdot 10^{-5}$
1 фіз.атм.	$1,01325 \cdot 10^5$	760,00	$1,01325 \cdot 10^6$	1
(атм.)				
1 техн.атм.	$9,80665 \cdot 10^4$	735,561	$9,80605 \cdot 10^5$	0,967841
(ат)				
1 мм рт.ст.	133,322	1	1333,22	$1,31579 \cdot 10^{-3}$
1 бар	$10^5$	750,064	$10^6$	0,986923
1 кгс/см <sup>2</sup>	9,80665	0,0235561	98,0665	$0,967841 \cdot 10^{-4}$

Таблиця Д.3

## Важливі фізичні постійні

Найменування	Значення
Швидкість світла в вакуумі, с	$2,99792458 \cdot 10^8 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$
Стала Планка, $\hbar$	$6,626178 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
Абсолютний нуль температури	$-273,15^\circ\text{C}$
Число Авогадро, $N_A$	$6,022045 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Стала Больцмана, $K$	$1,380662 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1}$
Стала Фарадея, $F$	$9,648456 \cdot 10^4 \text{ Кл} \cdot \text{моль}^{-1}$
Універсальна газова стала, $R$	$8,31441 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ $0,08206 \text{ л} \cdot \text{атм} \cdot \text{град} \cdot \text{моль}^{-1}$ $0,0833143 \text{ л} \cdot \text{бар} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{моль}^{-1}$ $0,0083143 \text{ м}^3 \cdot \text{КПа} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{моль}^{-1}$ $1,9858 \text{ кал} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$
Об'єм 1 моля ідеального газу за нормальних умов ( $T=273 \text{ K}$ , $P=1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ), $V_0$	$22,41383 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \cdot \text{моль}^{-1}$
Прискорення вільного падіння, $g_n$	$9,80665 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$

Таблиця Д.4

Атомні маси хімічних елементів  
(кг/кімоль)

Назва елементу	Хімічний символ	Атомна маса	Назва елементу	Хімічний символ	Атомна маса
Азот	<i>N</i>	14,01	Молібден	<i>Mo</i>	95,94
Алюміній	<i>Al</i>	26,98	Мім'як	<i>As</i>	74,92
Барій	<i>Ba</i>	137,34	Натрій	<i>Na</i>	22,99
Ванадій	<i>V</i>	50,94	Нікель	<i>Ni</i>	58,70
Вісмут	<i>Bi</i>	208,98	Олово	<i>Sn</i>	118,69
Вольфрам	<i>W</i>	183,85	Паладій	<i>Pd</i>	106,40
Вуглець	<i>C</i>	12,01	Платина	<i>Pt</i>	195,09
Залізо	<i>Fe</i>	55,85	Ртуть	<i>Hg</i>	200,59
Золото	<i>Au</i>	196,97	Свинець	<i>Pb</i>	207,20
Йод	<i>I</i>	126,90	Сірка	<i>S</i>	32,06
Кадмій	<i>Cd</i>	112,40	Срібло	<i>Ag</i>	107,82
Калій	<i>K</i>	39,10	Стронцій	<i>Sr</i>	87,62
Кальцій	<i>Ca</i>	40,08	Сурма	<i>Sb</i>	121,75
Кисень	<i>O</i>	16,00	Талій	<i>Tl</i>	204,37
Кобальт	<i>Co</i>	58,93	Титан	<i>Ti</i>	47,90
Кремній	<i>Si</i>	28,09	Фосфор	<i>P</i>	30,97
Літій	<i>Li</i>	6,94	Фтор	<i>F</i>	19,00
Марганець	<i>Mn</i>	54,94	Хлор	<i>Cl</i>	35,45
Магній	<i>Mg</i>	24,30	Хром	<i>Cr</i>	52,00
Мідь	<i>Cu</i>	63,55	Цинк	<i>Zn</i>	65,38

Термодинамічні властивості деяких простих  
речовин і сполук

Таблиця Д.5

№ пп	Речовина	$\Delta H_f^o, 298$ , кДж/моль	$\Delta H_{f,298}^o$ , кДж/моль	$\Delta G_f^o, 298$ , кДж/моль	$S^o, 298$ , Дж/моль·К	$C_p^o, 298$ , Дж/моль·К
Прості речовини						
I. Al (кр.)	0,00	-887,85	0,00	28,33	24,35	
2. Al (р.)	-	-	-	-	-	
3. C(графіт)	0,00	-398,51	0,00	5,74	8,54	
4. C (алмаз)	I,83	-895,34	2,83	2,37	6,II	
5. Ca (кр. $\alpha$ )	0,00	-685,09	0,00	41,63	26,35	
6. Ca (кр. $\beta$ )	-	-	-	-	-	
7. Ca (р.)	-	-	-	-	-	
8. Si (кр.)	0,00	-162,00	0,00	33,I4	24,43	
9. Si (р.)	-	-	-	-	-	
10. Fe (кр. $\alpha$ )	0,00	-4II,08	0,00	27,II7	25,00	
II. Fe (кр. $\beta$ )	-	-	-	-	-	
12. Fe (кр. $\gamma$ )	-	-	-	-	-	
13. Fe (кр. $\zeta$ )	-	-	-	-	-	
14. Fe (р.)	-	-	-	-	-	
15. H <sub>2</sub> (г.)	0,00	-24I,8I	0,00	130,52	28,83	
16. Mg (кр.)	0,00	-60I,49	0,00	32,68	24,89	
17. Mg (р.)	-	-	-	-	-	
18. Mn (кр. $\alpha$ )	0,00	-	0,00	32,0I	26,28	
19. Mn (кр. $\beta$ )	-	-	-	-	-	
20. Mn (кр. $\gamma$ )	-	-	-	-	-	
21. Mn (кр. $\delta$ )	-	-	-	-	-	
22. Mn (р.)	-	-	-	-	-	
23. N <sub>2</sub> (г.)	0,00	-	0,00	19I,50	29,I2	
24. O <sub>2</sub> (г.)	0,00	0,00	0,00	205,04	29,37	
25. Pb (кр.)	0,00	-276,56	0,00	64,8I	26,82	
26. Pb (р.)	-	-	-	-	-	
27. S (монокл.)	0,38	-396,23	0,19	32,55	28,64	
28. S (ромб.)	0,00	-895,85	0,00	3I,92	22,68	
29. S <sub>2</sub> (г.)	I28,37	-920,I7	79,42	228,03	32,5I	

№ пп	Коефіцієнти рівняння $C_p^o = f(T)$			Температур- ний інтер- вал ряду $C_p^o, K$	Перетво- рення	Темпера- тура пе- ретво- рення, K	$\Delta H_{\text{перетв.}}$ кДж/моль
	a	$b \cdot 10^3$	$c \cdot 10^{-5}$				
I.	20,67	I2,38	0,00	273-932	кр. $\rightarrow$ р.	932	10,80
2.	29,3I	0,00	0,00	932-2700	р. $\rightarrow$ г.	2733	293,00
3.	16,88	4,77	-8,54	298-2500			
4.	9,12	I3,22	-6,19	298-I200			
5.	22,22	I3,93	0,00	273-713	$\alpha \rightarrow \beta$	713	I,00
6.	6,28	32,40	I0,47	713-II23	$\beta \rightarrow$ р.	II23	8,79
7.	30,98	0,00	0,00	II23-I700	р. $\rightarrow$ г.	I693	I53,60
8.	22,64	6,28	0,00	298-I356	кр. $\rightarrow$ р.	I356	I2,98
9.	3I,40	0,00	0,00	I356-2800	р. $\rightarrow$ г.	2843	302,00
IO.	I7,50	24,78	0,00	273-I033	$\alpha \rightarrow \beta$	I033	2,76
II.	37,68	0,00	0,00	I033-II8I	$\beta \rightarrow \gamma$	II80	0,92
I2.	7,70	I9,5I	0,00	II8I-I674	$\gamma \rightarrow \delta$	I674	0,88
I3.	43,96	0,00	0,00	I674-I8I2	$\delta \rightarrow$ р.	I8I2	I5,49
I4.	4I,87	0,00	0,00	I8I2-I873	р. $\rightarrow$ г.	3343	350,00
I5.	27,28	3,26	0,50	298-3000			
I6.	22,30	I0,63	-0,42	298-923	кр. $\rightarrow$ р.	923	8,79
I7.	32,99	0,00	0,00	923-I379	р. $\rightarrow$ г.	I378	I3I,80
I8.	23,85	I4,I4	-I,59	298-I000	$\alpha \rightarrow \beta$	99I	20,10
I9.	35,08	2,76	0,00	I000-I374	$\beta \rightarrow \gamma$	I373	2,30
20.	44,80	0,00	0,00	I374-I4I0	$\gamma \rightarrow \delta$	I409	I,80
2I.	47,3I	0,00	0,00	I4I0-I5I7	$\delta \rightarrow$ р.	I5I7	I3,40
22.	46,05	0,00	0,00	I5I7-2368	р. $\rightarrow$ г.	2368	227,00
23.	27,88	4,27	0,00	298-2500			
24.	3I,46	3,39	-3,77	298-3000			
25.	24,23	8,7I	0,00	298-60I	кр. $\rightarrow$ р.	60I	4,77
26.	32,49	-3,09	0,00	60I-I200	р. $\rightarrow$ г.	20I3	I77,70
27.	23,64	0,00	0,00	368-392	кр. $\rightarrow$ р.	392	I,26
28.	22,68	0,00	0,00	273-368	р. $\rightarrow$ м.	368	0,38
29.	36,II	I,09	-3,5I	298-2000			

Продовження табл. А.5

№ пп	Речовина	$\Delta H_{f,298}^o$ , кДж/моль	$\Delta H_{\infty,298}^o$ , кДж/моль	$\Delta G_{f,298}^o$ , кДж/моль	$S_{298}^o$ , Дж/моль·К	$C_p^o,298$ , Дж/моль·К
---------	----------	------------------------------------	---	------------------------------------	----------------------------	----------------------------

30. $Si$ (кр.)	0,00	-910,94	0,00	18,33	19,99
31. $Sn$ (кр.)	0,00	-580,74	0,00	51,55	26,99
32. $Sn$ (р.)	-	-	-	-	-
33. $Tl$ (кр.)	0,00	-944,75	0,00	30,63	25,02
34. $Zn$ (кр.)	0,00	-348,11	0,00	41,63	25,44
35. $Xn$ (р.)	-	-	-	-	-

## Неорганічні сполуки

36. $Al_2O_3$ (корунд)	-1675,69	0,00	-1582,27	50,92	79,04
37. $CO$ (г.)	-110,53	-282,98	-137,15	197,55	29,14
38. $CO_2$ (г.)	-393,51	0,00	-394,37	218,66	37,11
39. $CS_2$ (р.)	88,70	-1273,92	64,41	151,04	75,65
40. $CS_2$ (г.)	116,70	-1301,91	66,55	287,77	45,48
41. $CaC_2$ (кр.α)	-59,83	-1362,28	-64,85	69,96	62,72
42. $CaC_2$ (кр.β)	-	-	-	-	-
43. $CaCO_3$ (кр.)	-1206,83	0,00	-1128,35	91,71	83,47
44. $CaO$ (кр.)	-635,09	0,00	-603,46	38,04	42,05
45. $Ca(OH)_2$ (кр.)	-985,12	0,00	-897,52	83,39	87,49
46. $CaS$ (кр.)	-476,98	-553,96	-471,93	56,61	47,49
47. $CaSO_4$ (кр.)	-1436,28	0,00	-1328,90	106,69	99,66
48. $CaSO_3$ (кр.)	-1635,00	0,00	-1550,00	82,20	85,30
49. $Ca_2SiO_4$ (кр.α)	-2250,00	0,00	-2140,00	128,00	129,00
50. $Cu_2O$ (кр.)	-173,18	-150,82	-150,56	92,93	63,64
51. $CuO$ (кр.)	-162,00	0,00	-134,26	42,63	42,30
52. $CuS$ (кр.)	-53,14	-504,71	-53,58	66,53	47,82
53. $CuSO_4$ (кр.)	-770,90	0,00	-661,79	109,20	98,87
54. $Fe_3C$ (кр.α)	22,61	-1649,36	14,60	101,32	106,00
55. $Fe_3C$ (кр.β)	-	-	-	-	-
56. $FeCO_3$ (кр.)	-738,15	-	-665,09	95,40	83,26
57. $FeO$ (кр.)	-264,85	-146,23	-244,30	60,75	49,92
58. $Fe_3O_4$ (кр.)	-1117,13	-116,11	-1014,17	146,19	150,79

№ пп	Коефіцієнти рівняння $C_p^o = f(T)$ ,			Температур- ний інтер- вал ряду $C_p^o = g(T), K$	Перетво- рення	Темпера- тура пе- ретво- рення, К	$\Delta H_{\text{перетв.}}$ кДж/моль
	$\alpha$	$\beta \cdot 10^3$	$c \cdot 10^{-5}$				
30.	22,82	3,86	-3,54	298-1685	кр. → р.	1685	50,66
31.	21,59	18,10	0,00	298-505	кр. → р.	505	7,03
32.	21,54	6,15	12,88	505-2900	р. → г.	3003	296,10
33.	21,10	10,54	0,00	298-II155	кр. → р.	II155	3,47
34.	22,38	10,04	0,00	278-693	кр. → р.	693	7,28
35.	31,40	0,00	0,00	693-II80	р. → г.	II80	II5,30
36.	II4,55	12,89	-34,31	298-II800	кр. → р.	2303	108,85
37.	28,41	4,10	-0,46	298-2500			
38.	44,14	9,04	-8,54	298-2500			
39.	77,03	0,00	0,00	298-3I9	р. → г.	3I9	26,78
40.	52,09	6,69	-7,53	298-I800			
41.	68,62	II,88	-8,66	298-720	α → β	720	5,57
42.	64,48	8,37	0,00	720-II275	β → р.	2573	
43.	104,52	21,92	-25,94	298-I200			
44.	49,62	4,52	-6,95	298-I800	кр. → р.	2873	79,54
45.	105,19	12,01	-19,00	298-600			
46.	42,68	15,90	0,00	298-I000			
47.	70,21	98,74	0,00	298-I400	кр. → р.	I673	28,05
48.	III,54	15,07	-27,30	298-I450	кр. → р.	I8I3	82,90
49.	151,77	36,97	-30,31	298-I200	кр. → р.	2403	
50.	56,57	29,29	0,00	298-I500	кр. → р.	I503	56,10
51.	43,83	I6,77	-5,88	298-I359			
52.	44,35	II,05	0,00	298-I273			
53.	78,53	7I,96	0,00	298-900	кр. → р.	473	
54.	82,23	83,74	0,00	278-463	α → β	463	0,75
55.	I07,26	I2,56	0,00	463-I500	β → р.	I500	5I,50
56.	48,66	II2,13	0,00	298-855			
57.	50,80	8,6I	-3,3I	298-I65I	кр. → р.	I65I	30,98
58.	86,27	208,92	0,00	298-I866	кр. → р.	1870	I38,16

Продовження табл. Д.5

№ пп	Речовина	Коефіцієнти рівняння					Перетво- рення	Темпера- тура пе- ретво- рення, К	$\Delta H_{\text{перетв.}}$ кДж/моль
		$C_p^o = f(T)$ ,	$\alpha$	$\beta \cdot 10^3$	$C' \cdot 10^{-5}$	Темпера- турний інтер- вал ряду $C_p^o = f(T), K$			
59.	$\text{Fe}_2\text{O}_3$ (кр.)	-822,16	0,00	-740,34	87,45	103,76			
60.	$\text{FeS}$ (кр. $\alpha$ )	-100,42	-723,01	-100,78	60,29	50,54			
61.	$\text{FeS}$ (кр. $\beta$ )	-	-	-	-	-			
62.	$\text{Fe}_2\text{S}_2$ (кр. $\gamma$ )	-177,40	-1041,88	-166,05	52,93	62,17			
63.	$\text{Fe}_3\text{O}_4$ (кр. $\gamma$ )	-927,59	120,66	-819,77	107,53	100,58			
64.	$\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ (кр.)	-1448,68	-284,47	-1340,01	145,28	133,02			
65.	$\text{H}_2\text{O}$ (кр.)	-291,85	0,00	-	-	-			
66.	$\text{H}_2\text{O}$ (р.)	-285,83	0,00	-237,23	69,95	75,30			
67.	$\text{H}_2\text{O}$ (г.)	-241,81	0,00	-228,61	188,72	33,61			
68.	$\text{H}_2\text{S}$ (г.)	-20,60	-617,08	-33,50	205,70	33,44			
69.	$\text{MgCO}_3$ (кр.)	-1095,85	0,00	-1012,15	65,10	76,11			
70.	$\text{MgO}$ (кр.)	-601,49	0,00	-569,27	27,07	37,20			
71.	$\text{MgSiO}_4$ (кр.)	-1287,42	0,00	-1173,25	91,55	95,60			
72.	$\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ (кр.)	-1498,45	0,00	-1410,12	67,83	81,82			
73.	$\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ (кр.)	-2043,99	0,00	-1920,05	95,25	118,03			
74.	$\text{MnO}_2$ (кр.)	-521,49	-	-466,68	53,14	54,02			
75.	$\text{MnO}$ (кр.)	-385,10	-	-363,34	61,50	44,10			
76.	$\text{Mn}_2\text{O}_3$ (кр.)	-957,72	-	-879,91	110,46	107,50			
77.	$\text{Mn}_3\text{O}_4$ (кр.)	-1387,60	-	-1282,91	154,81	148,08			
78.	$\text{MnS}$ (кр.)	-214,85	-	-219,36	80,75	49,92			
79.	$\text{Mn}_2\text{SiO}_4$ (кр.)	-1270,27	-	-1190,12	89,18	86,41			
80.	$\text{NH}_3$ (г.)	-45,94	-	-16,48	192,66	35,16			
81.	$\text{N}_2\text{O}$ (г.)	82,01	-	104,12	219,83	38,62			
82.	$\text{NO}$ (г.)	91,26	-	87,58	210,64	29,86			
83.	$\text{NO}_2$ (г.)	34,19	-	52,29	240,06	36,66			
84.	$\text{N}_2\text{O}_4$ (г.)	II, II	-	99,68	304,85	79,16			
85.	$\text{NaOH}$ (кр. $\alpha$ )	-426,35	0,00	-380,29	64,43	59,65			
86.	$\text{NaOH}$ (р.)	-	0,00	-	-	-			
87.	$\text{Na}_2\text{CO}_3$ (кр. $\alpha$ )	-1130,80	0,00	-1048,20	138,80	III, 30			
88.	$\text{Na}_2\text{SiO}_3$ (кр.)	-1561,43	0,00	-1467,50	113,76	III, 81			
89.	$\text{Na}_2\text{SiO}_3$ (р.)	-	0,00	-	-	-			
90.	$\text{PbO}$ (кр.)	-217,61	-58,95	-188,20	68,70	45,77			

Продовження табл. А.5

№ пп	Речовина	$\Delta H_{f,298}^{\circ}$ , кДж/моль	$\Delta H_{g,298}^{\circ}$ , кДж/моль	$\Delta E_{f,298}^{\circ}$ , кДж/моль	$S_{298}^{\circ},$ Дж/моль·К	$C_p, 298^{\circ}$ , Дж/моль·К
91.	$PbO_2$ (кр.)	-276,56	0,00	-217,55	71,92	64,77
92.	$PbS$ (кр.)	-100,42	-571,99	-98,77	91,21	49,48
93.	$S O_2$ (г.)	-296,90	-98,95	-300,21	248,07	39,87
94.	$S O_3$ (г.)	-395,86	0,00	-371,17	256,69	50,09
95.	$SiO_2$ (кв. $\alpha$ )	-910,94	0,00	-856,67	41,84	44,43
96.	$SiO_2$ (кв. $\beta$ )	-911,32	0,00	-	-	-
97.	$SiO_2$ (тр. $\alpha$ )	-909,06	0,00	-855,29	43,51	44,60
98.	$SiO_2$ (тр. $\beta$ )	-	0,00	-	-	-
99.	$SiO_2$ (кр. $\alpha$ )	-909,48	0,00	-855,46	42,68	44,18
100.	$SiO_2$ (кр. $\beta$ )	-908,24	0,00	-	-	-
101.	$S pO$ (кр.)	-285,98	-294,78	-256,88	56,48	44,35
102.	$SnO_2$ (кр.)	-580,74	0,00	-519,87	52,30	52,59
103.	$SnS$ (кр.)	-110,17	-866,42	-108,24	76,99	49,25
104.	$SnS$ (кр. $\beta$ )	-77,87	-	-	98,80	-
105.	$TiO_2$ (кр.)	-944,75	0,00	-889,49	50,33	55,04
106.	$XnO$ (кр.)	-348,II	0,00	-318,I0	43,51	40,25
107.	$XnS$ (кр.)	-205,I8	-538,78	-200,44	57,66	45,36
108.	$XnSO_4$ (кр.)	-981,36	0,00	-870,I2	110,54	99,06

## Органічні

I09.	$CH_4$ (г.)	-74,85	-802,28	-50,85	I86,27	35,71
II0.	$C_2H_2$ (г.)	226,75	-1255,60	209,21	200,82	43,93
III.	$C_2H_4$ (г.)	52,30	-1322,97	68,14	219,45	43,56
II2.	$C_2H_6$ (г.)	-84,67	-1427,40	-32,93	229,49	52,64
II3.	$C_6H_6$ (р.)	49,03	-3135,52	I24,38	I73,26	I35,14
II4.	$C_6H_6$ (г.)	82,93	-3169,41	I29,68	269,20	81,67
II5.	$C_6H_{12}$ (р.)	-156,23	-3655,69	26,60	204,35	I56,48
II6.	$C_6H_{12}$ (г.)	-I23,I4	-3688,80	31,70	298,24	I06,27
II7.	$CH_3OH$ (р.)	-238,57	-638,60	-I66,27	I26,78	86,60
II8.	$CH_3OH$ (г.)	-200,00	-676,I3	-I62,38	239,76	44,14
II9.	$C_2H_5OH$ (р.)	-276,98	-1235,48	-I74,15	I60,67	III,96
I20.	$C_2H_5OH$ (г.)	-234,80	-1277,65	-I67,96	281,38	65,75

NN пп	Коефіцієнти рівняння $C_p^0 = f(T)$ , Дж/моль·К	Температур- ний інтер- вал ряду $C_p^0 = g(T)$ , К		Перетво- рення	Темпера- тура пе- ретво- рення, К	$\Delta H$ перетв. кДж/моль
		$a$	$b \cdot 10^3$	$c \cdot 10^{-5}$		
91.	53,14	32,64	0,00	298-I000		
92.	46,74	9,20	0,00	298-I392	кр. $\rightarrow$ р.	I383
93.	46,19	7,87	-7,70	298-2000		
94.	64,98	II,75	-I6,37	298-I300		
95.	46,99	34,81	-II,30	298-846	$\alpha \rightarrow \beta$	846
96.	60,29	8,12	0,00	846-2000	$\beta \rightarrow \rho$	I883
97.	I3,68	I03,76	0,00	298-390	$\alpha \rightarrow \beta$	390
98.	57,07	II,05	0,00	390-2000	$\beta \rightarrow \rho$	I953
99.	I7,91	88,12	0,00	298-515	$\alpha \rightarrow \beta$	515
I00.	60,25	8,54	0,00	515-2000	$\beta \rightarrow \rho$	I986
I01.	39,96	I4,64	0,00	298-I200		
I02.	73,85	I00,04	-II,59	298-I500	кр. $\rightarrow$ р.	I898
I03.	35,69	3I,30	3,77	298-875	$\alpha \rightarrow \beta$	875
I04.	40,96	I5,65	0,00	875-II50	$\beta \rightarrow \rho$	II53
I05.	62,86	II,36	-9,96	298-2I40	кр. $\rightarrow$ р.	2I93
I06.	48,99	5,I0	-9,I2	298-I600	кр. $\rightarrow$ р.	2248
I07.	49,25	5,27	-4,85	298-I290		
I08.	76,36	76,I5	0,00	298-I020		

## С П О Л У К И

Коефіцієнти рівняння $C_p^0 = f(T)$ , Дж/моль·К	$a$		$b \cdot 10^3$	$c \cdot 10^6$	р. $\rightarrow$ г.	353	30,92
	$a$	$b \cdot 10^3$	$c \cdot 10^6$				
I09.	I4,32	76,66	-I7,43	298-I500			
II0.	26,44	66,65	-26,48	298-I000			
III.	II,32	I22,0I	-37,90	298-I500			
II2.	5,75	I75,II	-57,85	298-I500			
II3.	59,50	255,0I	0,00	28I-353			
II4.	-2I,09	400,I2	-I69,87	298-I000			
II5.	-	-	-				
II6.	-5I,7I	598,77	-230,00	298-I000			
II7.	-	-	-				
II8.	I5,28	I05,20	-3I,04	298-I000			
II9.	-	-	-				
I20.	I0,99	204,70	-74,20	298-I000			

Таблиця Д.6  
Термодинамічні характеристики реакцій ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CS}_2$ ,  
 $\text{SO}_3$ ,  $\text{C}_6\text{H}_6$ ,  $\text{C}_6\text{H}_{12}$ ,  $\text{CH}_3\text{OH}$ ,  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ,  $\text{S}_2$  знаходяться  
у газовому стані; всі інші речовини - у стані,  
стійкому за стандартних умов)

№ пп	Реакція	$\Delta H^\circ_{298}$	$\Delta G^\circ_{298}$	$\lg K_p, 298$
		кДж	кДж	кДж
I.	$4 \text{Al} + 3\text{O}_2 = 2 \text{Al}_2\text{O}_3$	-3851,40	-3164,50	555,56
2.	$\text{C}$ графіт $\xrightarrow{\text{алмаз}}$	-1,83	-2,84	-0,50
3.	$\text{C} + 2\text{H}_2 = \text{CH}_4$	-74,82	-50,84	8,92
4.	$2\text{C} + \text{H}_2 = \text{C}_2\text{H}_2$	226,75	209,21	-36,73
5.	$2\text{C} + 2\text{H}_2 = \text{C}_2\text{H}_4$	52,30	68,13	-II,96
6.	$2\text{C} + 3\text{H}_2 = \text{C}_2\text{H}_6$	-84,67	-32,90	5,78
7.	$6\text{C} + 3\text{H}_2 = \text{C}_6\text{H}_6$	82,92	129,70	-22,77
8.	$6\text{C} + 6\text{H}_2 = \text{C}_6\text{H}_{12}$	-123,14	31,70	-5,57
9.	$\text{C} + \text{H}_2\text{O} = \text{CO} + \text{H}_2$	131,26	91,44	-I6,05
IO.	$\text{C} + 2\text{H}_2\text{O} = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2$	90,47	62,83	-II,03
II.	$\text{C} + \text{O}_2 = \text{CO}_2$	-393,51	-394,35	69,23
I2.	$2\text{C} + \text{O}_2 = 2\text{CO}$	-221,06	-274,30	48,16
I3.	$\text{C} + \text{S}_2 = \text{CS}_2$	-II,67	-12,82	2,25
I4.	$2\text{CH}_4 = \text{C}_2\text{H}_2 + 3\text{H}_2$	376,30	810,78	-54,56
I5.	$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} = \text{CO} + 3\text{H}_2$	206,II	142,30	-24,98
I6.	$\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} = \text{CO}_2 + 4\text{H}_2$	I65,00	II3,70	-I9,96
I7.	$\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{S} = \text{CS}_2 + 4\text{H}_2$	232,80	184,40	-32,37
I8.	$2\text{CH}_4 + \text{O}_2 = 2\text{CH}_3\text{OH}$	-252,30	-233,I0	40,92
I9.	$3\text{C}_2\text{H}_2 = \text{C}_6\text{H}_6$	-597,32	-498,00	87,43
20.	$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	-802,30	-800,70	I40,57
21.	$\text{C}_2\text{H}_2 + \text{H}_2 = \text{C}_2\text{H}_4$	-I74,42	-I41,I0	24,77
22.	$\text{C}_2\text{H}_2 + 2\text{H}_2 = \text{C}_2\text{H}_6$	-III,40	-242,I4	42,51
23.	$2\text{C}_2\text{H}_2 + 5\text{O}_2 = 4\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	-25II,20	-2453,I2	430,67
24.	$3\text{C}_2\text{H}_4 = 2\text{CH}_4 + 2\text{C}_2\text{H}_2$	I46,90	II2,30	-I9,71
25.	$3\text{C}_2\text{H}_4 = \text{C}_6\text{H}_{12}$	-280,00	-I72,72	30,32
26.	$\text{C}_2\text{H}_4 + \text{H}_2 = \text{C}_2\text{H}_6$	-I36,97	-101,08	I7,74
27.	$\text{C}_2\text{H}_4 + \text{H}_2\text{O} = \text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	-45,30	-7,50	I,81

Продовження табл. Д.6

№ пп	Реакція	$\Delta H^\circ_{298}$	$\Delta G^\circ_{298}$	$\lg K_p, 298$
		кДж	кДж	
28.	$\text{C}_2\text{H}_4 + 3\text{O}_2 = 2\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	-1322,94	-1314,10	230,71
29.	$2\text{C}_2\text{H}_6 + \text{O}_2 = 2\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	-300,26	-270,06	47,41
30.	$2\text{C}_2\text{H}_6 + 7\text{O}_2 = 4\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$	-2854,80	-2883,28	506,20
31.	$\text{C}_6\text{H}_6 + 3\text{H}_2 = \text{C}_6\text{H}_{12}$	-206,07	-97,98	I7,20
32.	$2\text{C}_6\text{H}_6 + 15\text{O}_2 = 12\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$	-6338,84	-6363,48	III7,18
33.	$\text{C}_6\text{H}_{12} + 9\text{O}_2 = 6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$	-3688,78	-3769,58	661,79
34.	$2\text{CH}_3\text{OH} + 3\text{O}_2 = 2\text{CO}_2 + 4\text{H}_2\text{O}$	-1352,26	-1378,42	242,00
35.	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} + 3\text{O}_2 = 2\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$	-1277,65	-1306,61	222,39
36.	$2\text{CO} = \text{C} + \text{CO}_2$	-I72,45	-I20,07	21,02
37.	$\text{CO} + 2\text{H}_2 = \text{CH}_3\text{OH}$	-90,47	-25,23	4,41
38.	$2\text{CO} + 2\text{H}_2 = \text{CH}_4 + \text{CO}_2$	-247,30	-170,92	29,93
39.	$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} = \text{CO}_2 + \text{H}_2$	-4I,I2	-28,49	4,98
40.	$2\text{CO} + \text{O}_2 = 2\text{CO}_2$	-565,96	-514,44	90,09
41.	$\text{CS}_2 + 2\text{H}_2\text{O} = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{S}$	-67,79	-70,70	I2,41
42.	$\text{CS}_2 + \text{O}_2 = \text{CO}_2 + \text{S}_2$	-38I,84	-38I,50	66,97
43.	$\text{CS}_2 + 3\text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{SO}_2$	-II04,0I	-I06I,34	I86,33
44.	$\text{CS}_2 + 4\text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{SO}_3$	-I30I,9I	-I203,26	2I2,25
45.	$\text{Ca} + \text{H}_2\text{O} = \text{CaO} + \text{H}_2$	-393,28	-374,85	65,81
46.	$\text{Ca} + 2\text{H}_2\text{O} = \text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{H}_2$	-50I,50	-440,30	77,30
47.	$2\text{Ca} + \text{O}_2 = 2\text{CaO}$	-I270,I8	-I206,92	2II,36
48.	$\text{CaC}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{CaO} + \text{C}_2\text{H}_2$	-I06,70	-I00,79	I7,69
49.	$\text{CaC}_2 + 2\text{H}_2\text{O} = \text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{C}_2\text{H}_2$	-2I4,92	-I66,24	29,18
50.	$\text{CaC}_2 + 5\text{H}_2\text{O} = \text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + 5\text{H}_2$	-3I3,82	55,09	
51.	$2\text{CaC}_2 + 5\text{O}_2 = 2\text{CaO} + 4\text{CO}_2$	-2724,66	-2654,70	466,06
52.	$\text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2 = \text{CaSiO}_3 + \text{CO}_2$	89,26	40,65	-7,13
53.	$\text{CaO} + 3\text{C} = \text{CaC}_2 + \text{CO}$	464,73	40I,46	-70,48
54.	$\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} = \text{Ca}(\text{OH})_2$	-I08,22	-65,45	II,49
55.	$\text{CaO} + \text{CO}_2 = \text{CaCO}_3$	-I78,23	-I30,52	22,85
56.	$\text{CaO} + \text{SiO}_3 = \text{CaSiO}_4$	-405,34	-349,27	6I,16
57.	$\text{CaO} + \text{SiO}_2 = \text{CaSiO}_3$	-88,97	-89,87	I5,73
58.	$2\text{CaO} + \text{SiO}_2 = \text{Ca}_2\text{SiO}_4$	-68,88	-76,4I	I3,46
59.	$\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2 = \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$	-70,0I	-65,07	II,42

Продовження табл. Д.6

№ пп	Реакція	$\Delta H^\circ_{298}$	$\Delta G^\circ_{298}$	$\lg K_{P,298}$
		кДж		
60.	$\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{SO}_3 = \text{CaSO}_4 + \text{H}_2\text{O}$	-297,12	-283,82	49,83
61.	$\text{CaS} + 2\text{H}_2\text{O} = \text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{H}_2\text{S}$	-45,12	-1,87	0,33
62.	$\text{CaS} + 2\text{O}_2 = \text{CaSO}_4$	-959,30	-851,98	149,39
63.	$\text{CaS} + 2\text{O}_2 = \text{CaO} + \text{SO}_3$	-553,96	-502,70	88,25
64.	$4\text{CaS} + 2\text{SO}_2 = 4\text{CaO} + 3\text{S}_2$	346,47	312,56	-54,87
65.	$\text{CaSO}_4 + 4\text{C} = \text{CaS} + 4\text{CO}$	517,28	303,37	-53,26
66.	$2\text{CaSiO}_3 = \text{Ca}_2\text{SiO}_4 + \text{SiO}_2$	109,06	103,33	-18,14
67.	$\text{Ca}_2\text{SiO}_4 = \text{CaSiO}_3 + \text{CaO}$	-20,09	-13,46	2,36
68.	$2\text{C}_2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{C}_2\text{H}_4$	-324,00	-268,52	47,02
69.	$4\text{Si} + \text{O}_2 = 2\text{Si}_2\text{O}$	-346,36	-301,12	52,73
70.	$2\text{Si} + \text{S}_2 = 2\text{SiS}$	-284,65	-186,58	32,76
71.	$\text{Si}_2\text{O} + \text{C} = 2\text{Si} + \text{CO}$	62,65	13,41	-2,84
72.	$\text{Si}_2\text{O} + \text{CO} = 2\text{Si} + \text{CO}_2$	-109,80	-106,66	18,67
73.	$\text{Si}_2\text{O} + \text{H}_2 = 2\text{Si} + \text{H}_2\text{O}$	-68,63	-78,05	13,66
74.	$2\text{Si}_2\text{O} + \text{O}_2 = 4\text{SiO}$	-301,64	-235,92	41,31
75.	$\text{SiO} + \text{C} = \text{Si} + \text{CO}$	51,47	-2,89	0,51
76.	$\text{SiO} + \text{CO} = \text{Si} + \text{CO}_2$	-120,98	-122,96	21,53
77.	$\text{SiO} + \text{H}_2 = \text{Si} + \text{H}_2\text{O}$	-79,81	-94,35	16,52
78.	$2\text{SiS} + \text{SO}_2 = 2\text{SiO} + 2\text{S}_2\text{O}_2$	-811,52	-762,66	133,56
79.	$\text{SiS} + 2\text{O}_2 = \text{SiO} + \text{SO}_3$	-504,71	-451,85	79,33
80.	$\text{SiS} + 2\text{O}_2 = \text{SiS}_2\text{O}_4$	-717,76	-608,21	106,51
81.	$2\text{SiS}_2\text{O}_4 = 2\text{SiO} + 2\text{S}_2\text{O}_2 + \text{O}_2$	624,00	454,64	-79,62
82.	$3\text{Fe} + \text{C} = \text{Fe}_3\text{C}$	22,61	14,16	-2,56
83.	$3\text{Fe} + 2\text{CO} = \text{Fe}_3\text{C} + \text{CO}_2$	-149,84	-105,47	18,52
84.	$\text{Fe} + \text{H}_2\text{O} = \text{FeO} + \text{H}_2$	-23,04	-15,69	2,74
85.	$2\text{Fe} + 3\text{H}_2\text{O} = \text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{H}_2$	-96,73	-54,51	9,57
86.	$3\text{Fe} + 4\text{H}_2\text{O} = \text{Fe}_3\text{O}_4 + 4\text{H}_2$	-149,89	-99,73	17,51
87.	$2\text{Fe} + \text{O}_2 = 2\text{FeO}$	-529,70	-488,60	85,57
88.	$3\text{Fe} + 2\text{O}_2 = \text{Fe}_3\text{O}_4$	-1117,13	-1014,17	177,92
89.	$4\text{Fe} + 3\text{O}_2 = 2\text{Fe}_2\text{O}_3$	-1644,32	-1480,68	259,31
90.	$2\text{Fe} + \text{S}_2 = 2\text{FeS}$	-329,21	-280,98	49,20
91.	$\text{FeCO}_3 = \text{FeO} + \text{CO}_2$	79,79	26,42	-4,62

Продовження табл. Д.6

№ пп	Реакція	$\Delta H^\circ_{298}$	$\Delta G^\circ_{298}$	$\lg K_{P,298}$
		кДж		
92.	$2\text{FeCO}_3 + \text{H}_2\text{O} = \text{Fe}_2\text{O}_3 + 2\text{CO}_2 + \text{H}_2$	108,93	29,71	-5,21
93.	$3\text{FeO} + 2\text{Al} = 3\text{Fe} + \text{Al}_2\text{O}_3$	-881,14	-849,37	149,II
94.	$\text{FeO} + \text{C} = \text{Fe} + \text{CO}$	154,32	107,15	-18,76
95.	$\text{FeO} + \text{CO} = \text{Fe} + \text{CO}_2$	-18,13	-12,92	2,26
96.	$\text{FeO} + \text{Ca} = \text{Fe} + \text{CaO}$	-370,24	-359,16	68,05
97.	$4\text{FeO} = \text{Fe} + \text{Fe}_3\text{O}_4$	-57,73	-36,97	6,47
98.	$\text{FeO} + \text{H}_2 = \text{Fe} + \text{H}_2\text{O}$	23,03	15,69	-2,75
99.	$\text{FeO} + \text{Mg} = \text{Fe} + \text{MgO}$	-336,64	-324,97	57,05
100.	$\text{FeO} + \text{Mn} = \text{Fe} + \text{MnO}$	-120,25	-119,04	20,90
101.	$4\text{FeO} + \text{O}_2 = 2\text{Fe}_2\text{O}_3$	-584,92	-503,48	88,20
102.	$6\text{FeO} + \text{O}_2 = 2\text{Fe}_3\text{O}_4$	-645,16	-562,54	98,5I
103.	$2\text{FeO} + \text{Si} = 2\text{Fe} + \text{SiO}_2$	-381,24	-368,07	64,46
104.	$\text{FeO} + \text{Zn} = \text{Fe} + \text{ZnO}$	-83,26	-73,80	12,96
105.	$3\text{Fe}_3\text{O}_4 + 8\text{Al} = 9\text{Fe} + 4\text{Al}_2\text{O}_3$	-3351,37	-3286,57	575,58
106.	$3\text{Fe}_3\text{O}_4 + 2\text{Al} = 9\text{FeO} + \text{Al}_2\text{O}_3$	-707,95	-738,46	129,64
107.	$\text{Fe}_3\text{O}_4 + 2\text{C} = 3\text{Fe} + 2\text{CO}_2$	330,II	225,43	-39,58
108.	$2\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{C} = 6\text{FeO} + \text{CO}_2$	251,65	168,17	-29,52
109.	$\text{Fe}_3\text{O}_4 + 4\text{CO} = 3\text{Fe} + 4\text{CO}_2$	-14,79	-15,II	2,64
110.	$\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO} = 3\text{FeO} + \text{CO}_2$	39,60	23,95	-4,19
III.	$\text{Fe}_3\text{O}_4 + 4\text{Ca} = 3\text{Fe} + 4\text{CaO}$	-1423,23	-1399,67	245,73
112.	$\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{Ca} = 3\text{FeO} + \text{CaO}$	-312,5I	-322,19	56,56
113.	$\text{Fe}_3\text{O}_4 + 4\text{H}_2 = 3\text{Fe} + 4\text{H}_2\text{O}$	149,89	99,73	-17,5I
114.	$\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{H}_2 = 3\text{FeO} + \text{H}_2\text{O}$	80,77	52,66	-9,24
115.	$\text{Fe}_3\text{O}_4 + 4\text{Mg} = 3\text{Fe} + 4\text{MgO}$	-1288,83	-1262,9I	221,72
116.	$\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{Mg} = 3\text{FeO} + \text{MgO}$	-278,9I	-288,00	50,56
117.	$\text{Fe}_3\text{O}_4 + 4\text{Mn} = 3\text{Fe} + 4\text{MnO}$	-423,27	-439,19	77,10
118.	$\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{Mn} = 3\text{FeO} + \text{MnO}$	-62,52	-82,07	14,4I
119.	$4\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{O}_2 = 6\text{Fe}_2\text{O}_3$	-464,44	-385,36	67,48
120.	$\text{Fe}_3\text{O}_4 + 2\text{Si} = 3\text{Fe} + 2\text{SiO}_2$	-704,75	-699,17	122,75
121.	$2\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{Si} = 6\text{FeO} + \text{SiO}_2$	-265,78	-294,I3	51,64
122.	$\text{Fe}_3\text{O}_4 + 4\text{Zn} = 3\text{Fe} + 4\text{ZnO}$	-275,3I	-258,23	45,33

Продовження табл. Д.6

№ пп	Реакція	$\Delta H^\circ$	$\Delta G^\circ$	$\lg K_P, 298$
		298	298	
		кДж		
I23.	$Fe_3O_4 + Zn = 3FeO + ZnO$	-25,53	-36,83	6,46
I24.	$Fe_2O_3 + 2Al = 2Fe + Al_2O_3$	-853,53	-841,93	I47,44
I25.	$3Fe_2O_3 + 2Al = 6FeO + Al_2O_3$	-798,31	-827,05	I45,20
I26.	$9Fe_2O_3 + 2Al = 6Fe_3O_4 + Al_2O_3$	-979,03	-1004,23	I76,30
I27.	$2Fe_2O_3 + 3C = 4Fe + 3CO_2$	463,79	297,57	-52,24
I28.	$2Fe_2O_3 + C = 4FeO + CO_2$	I91,42	I09,II	-I9,I5
I29.	$6Fe_2O_3 + C = 4Fe_3O_4 + CO_2$	464,44	385,36	-67,65
I30.	$Fe_2O_3 + 3CO = 2Fe + 3CO_2$	-26,78	-31,32	5,50
I31.	$Fe_2O_3 + CO = 2FeO + CO_2$	9,48	-5,48	0,95
I32.	$3Fe_2O_3 + CO = 2Fe_3O_4 + CO_2$	-50,76	-64,54	II,33
I33.	$Fe_2O_3 + 3Ca = 2Fe + 3CaO$	-I083,II	-I070,04	I87,86
I34.	$Fe_2O_3 + Ca = 2FeO + CaO$	-342,63	-351,72	6I,75
I35.	$3Fe_2O_3 + Ca = 2Fe_3O_4 + CaO$	-402,87	-410,78	72,12
I36.	$Fe_2O_3 + 3H_2 = 2Fe + 3H_2O$	96,73	54,51	-9,57
I37.	$Fe_2O_3 + H_2 = 2FeO + H_2O$	50,65	23,I3	-4,06
I38.	$3Fe_2O_3 + H_2 = 2Fe_3O_4 + H_2O$	-9,59	-35,93	6,31
I39.	$Fe_2O_3 + 3Mg = 2Fe + 3MgO$	-982,31	-967,47	I69,85
I40.	$Fe_2O_3 + Mg = 2FeO + MgO$	-809,03	-317,53	55,75
I41.	$3Fe_2O_3 + Mg = 2Fe_3O_4 + MgO$	-869,27	-376,59	66,II
I42.	$Fe_2O_3 + 3Mn = 2Fe + 3MnO$	-383,I4	-349,68	6I,39
I43.	$Fe_2O_3 + Mn = 2FeO + MnO$	-92,64	-III,60	I9,59
I44.	$3Fe_2O_3 + Mn = 2Fe_3O_4 + MnO$	-I52,88	-I70,66	29,96
I45.	$2Fe_2O_3 + 3Si = 4Fe + 3SiO_2$	-I088,50	-I089,33	I9I,24
I46.	$2Fe_2O_3 + Si = 4FeO + SiO_2$	-326,02	-353,I9	62,01
I47.	$6Fe_2O_3 + Si = 4Fe_3O_4 + SiO_2$	-446,50	-47I,3I	82,74
I48.	$Fe_2O_3 + 3Zn = 2Fe + 3ZnO$	-222,I7	-2I3,96	37,56
I49.	$Fe_2O_3 + Zn = 2FeO + ZnO$	-55,65	-66,36	II,65
I50.	$3Fe_2O_3 + Zn = 2Fe_3O_4 + ZnO$	-II5,89	-I25,42	22,02
I51.	$FeS + CaO = FeO + CaS$	-6,32	-II,I9	I,96
I52.	$4FeS + 7O_2 = 2Fe_2O_3 + 4SO_2$	-2430,24	-2278,40	399,0I
I53.	$4FeS + 9O_2 = 2Fe_2O_3 + 4SO_3$	-2826,04	-2562,24	449,83

Продовження табл. Д.6

№ пп	Реакція	$\Delta H^\circ$	$\Delta G^\circ$	$\lg K_P, 298$
		298	298	
		кДж		
I54.	$2FeS_2 = 2FeS + S_2$	282,35	209,96	-36,86
I55.	$4FeS_2 + 11O_2 = 2Fe_2O_3 + 8SO_2$	-3309,92	-3218,I6	563,60
I56.	$4FeS_2 + 15O_2 = 2Fe_2O_3 + 8SO_3$	-4101,52	-3785,84	664,65
I57.	$Fe_2SiO_4 + 2O_2 = 2FeO + 2CO_2 + SiO_2$	3I6,63	209,04	-36,70
I58.	$4FeS_2O_4 + O_2 = 2Fe_2O_3 + 4SO_3$	482,64	3I3,72	-55,08
I59.	$2H_2 + O_2 = 2H_2O$	-483,62	-457,22	80,07
I60.	$2H_2S + O_2 = 2H_2O + S_2$	-3I4,05	-3I0,80	54,56
I61.	$2H_2S + 3O_2 = 2H_2O + 2SO_2$	-I036,22	-990,64	I73,92
I62.	$H_2S + 2O_2 = H_2O + SO_3$	-6I7,06	-566,28	99,42
I63.	$2Mg + CO_2 = 2MgO + C$	-809,47	-744,I7	I30,65
I64.	$2Mg + O_2 = 2MgO$	-I202,98	-II38,54	I99,88
I65.	$MgCO_3 + SiO_2 = MgSiO_3 + CO_2$	II4,83	64,33	-II,29
I66.	$MgO + C = Mg + CO$	490,96	432,I2	-75,86
I67.	$MgO + CO_2 = MgCO_3$	-I00,85	-48,5I	8,5I
I68.	$MgO + MgSiO_3 = Mg_2SiO_4$	55,95	59,34	-I0,42
I69.	$MgO + SO_3 = MgSO_4$	-290,08	-232,8I	40,87
I70.	$MgO + SiO_2 = MgSiO_3$	I3,98	I5,82	-2,78
I71.	$2MgO + SiO_2 = Mg_2SiO_4$	69,93	75,I6	-I3,I9
I72.	$2MgSO_4 + 2SiO_2 = 2MgSiO_3 + 2SO_2 + O_2$	806,02	639,I8	-II2,2I
I73.	$2Mn + O_2 = 2MnO$	-770,20	-726,68	I27,28
I74.	$2Mn + SiO_2 = 2MnO + Si$	I40,74	I29,I9	-22,62
I75.	$MnO + C = Mn + CO$	274,57	226,I9	-39,6I
I76.	$2MnO + Si = 2Mn + SiO_2$	-I40,74	-I29,I9	22,62
I77.	$MnO + SiO_2 = MnSiO_3$	25,77	29,89	-5,25
I78.	$MnO_2 + 2C = Mn + 2CO$	300,43	I92,38	-33,77
I79.	$MnO_2 + CO = MnO + CO_2$	-I46,59	-I53,88	26,94
I80.	$MnO_2 + H_2 = MnO + H_2O$	-I05,42	-I25,27	2I,99
I81.	$MnO_2 + Si = Mn + SiO_2$	-389,45	-389,99	68,47
I82.	$2MnO + O_2 = 2MnO_2$	-272,78	-206,68	36,28
I83.	$MnSiO_3 + C = Mn + CO + SiO_2$	248,80	I96,30	-34,46
I84.	$N_2 + 3H_2 \rightleftharpoons 2NH_3$	-9I,88	-32,96	5,77

Таблиця Д.7

Продовження табл. Д.6

№ пп	Реакція	$\Delta H^\circ_{298}$	$\Delta G^\circ_{298}$	$\lg K_p, 298$
		кДж	кДж	
I85.	$N_2 + O_2 = 2NO$	182,52	175,16	-30,67
I86.	$2NH_3 + 3H_2O = 4N_2 + 3H_2O$	-879,64	-965,23	169,04
I87.	$4NH_3 + 3O_2 = 2N_2 + 6H_2O$	-1267,10	-1305,74	228,67
I88.	$4NH_3 + 5O_2 = 4NO + 6H_2O$	-902,06	-955,42	167,32
I89.	$N_2O + H_2 = N_2 + H_2O$	-323,82	-332,73	58,41
I90.	$2N_2O = 2N_2 + O_2$	-164,02	-208,24	36,56
I91.	$2NO + O_2 = 2NO_2$	-II4,14	-70,58	12,36
I92.	$2NO + 2SO_2 = N_2 + 2SO_3$	-380,42	-317,08	55,53
I93.	$2NO_2 = N_2O_4$	-57,27	-4,90	0,86
I94.	$Pb + O_2 = PbO_2$	-276,56	-217,55	38,19
I95.	$2Pb + O_2 = 2PbO$	-435,22	-376,40	66,08
I96.	$2PbO + O_2 = 2PbO_2$	-II7,90	-58,70	10,30
I97.	$2PbS + 5O_2 = 2PbO_2 + 2SO_3$	-II43,98	-976,96	172,04
I98.	$S_2 + 2H_2 = 2H_2S$	-169,57	-146,42	25,70
I99.	$S_2 + 2O_2 = 2SO_2$	-722,17	-679,84	II9,35
200.	$S_2 + 3O_2 = 2SO_3$	-920,17	-821,76	I44,27
201.	$2SO_2 + 4CO = S_2 + 4CO_2$	-409,75	-349,04	61,12
202.	$SO_2 + NO_2 = SO_3 + NO$	-41,88	-35,67	6,24
203.	$2SO_2 + O_2 = 2SO_3$	-I97,90	-141,92	24,85
204.	$Si + O_2 = SiO_2$	-910,94	-856,67	I50,02
205.	$SiO_2 + 2C = Si + 2CO$	689,88	582,37	-101,99
206.	$SiO_2 + 2Mg = Si + 2MgO$	-292,04	-281,87	49,48
207.	$Si + O_2 = SiO_2$	-580,74	-519,83	91,26
208.	$2Si + O_2 = 2SiO$	-571,96	-513,76	90,20
209.	$2SiO + O_2 = 2SiO_2$	-589,56	-525,90	92,33
210.	$2Si + S_2 = 2SiS$	-220,34	-216,48	38,00
211.	$2SiS + 5O_2 = 2SiO_2 + 2SO_3$	-I732,84	-1565,52	274,84
212.	$Ti + O_2 = TiO_2$	-944,75	-889,49	I56,16
213.	$2Zn + O_2 = 2ZnO$	-696,22	-636,20	III,41
214.	$2Zn + S_2 = 2ZnS$	-538,73	-480,30	84,32
215.	$ZnO + C = Zn + CO$	237,58	180,95	-31,69
216.	$ZnS + 2O_2 = ZnO + SO_3$	-538,68	-488,87	85,83

## Енергія зв'язку

Зв'язок	$-\Delta H, \text{кДж/моль}$	Зв'язок	$-\Delta H, \text{кДж/моль}$
H-H	435,97	C-CI	328,44
H-C	413,38	C-B	275,73
H-Si	294,55	C-J	240,16
H-N	390,79	Si-Si	I76,56
H-P	319,66	Si-O	369,03
H-O	462,75	N-N	I60,67
H-S	339,32	N=N	418,40
H-F	563,17	N≡N	946,42
H-CI	431,79	N-F	269,87
H-Bz	366,10	N-C	I99,58
H-J	298,74	P-P	214,64
C-C	347,69	O-O	I38,91
C=C	615,05	O-F	184,93
C≡C	811,70	O-CI	202,92
C-Si	289,95	S-S	212,97
C-N'	291,62	F-F	I53,13
C=N'	615,05	F-CI	253,55
C≡N	891,19	CI-CI	242,67
C-O	851,46	CI-Bz	218,22
C=O	719,65	CI-J	210,46
C-S	252,41	Bz-Bz	I92,88
C=S	476,98	Bz-J	I77,82
C-F	484,51	J-J	I51,04

Приведена енергія Гіббса, тепловміс та стандартна теплота утворення (при T = 0 K) деяких простих речовин та сполук

Таблиця Д.8

№ пп	Речовина	$\left( -\frac{G_f^\circ - H_f^\circ}{T} \right)$ , кДж/моль·К при T, К						
		298	400	600	800	1000	1200	1500
Прості речовини								
1. Al	I3,0I	I7,90	25,70	32,04	38,2I	44,52	-	
2. C(графіт)	2,20	3,45	6,24	8,99	II,64	I4,10	I7,60	
3. Ca	2I,79	28,00	37,30	44,6I	50,72	-	-	
4. Ci	I6,II	2I,52	29,80	36,2I	4I,52	45,93	52,5I	
5. Fe (α)	I2,10	I7,02	25,10	3I,9I	38,00	43,62	5I,II	
6. H <sub>2</sub>	I02,I7	III,07	I22,19	I30,48	I36,96	I43,02	I50,04	
7. Mg	I5,6I	2I,00	29,32	35,90	-	-	-	
8. N <sub>2</sub>	I62,40	I72,02	I82,79	I9I,27	I97,23	204,02	2II,07	
9. O <sub>2</sub>	I75,92	I84,23	I96,46	205,16	2I2,08	2I9,0I	226,02	
10. S	I45,40	I52,00	I6I,20	I67,70	I72,70	-	-	
II. S <sub>2</sub>	I98,40	207,0I	2I9,62	229,08	236,60	244,00	250,00	
12. Si	7,90	II,50	I7,70	22,7I	27,20	3I,00	-	
13. Zn	22,40	28,3I	37,30	45,60	53,10	-	-	
Неорганічні сполуки								
14. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	I7,30	29,30	52,70	74,05	92,80	I09,02	I3I,04	
15. CO	I68,47	I78,00	I88,88	I97,37	204,08	2II,0I	2I8,00	
16. CO <sub>2</sub>	I82,26	I92,00	205,02	2I7,16	226,4I	235,04	246,02	
17. CS <sub>2</sub>	202,02	2I4,00	229,56	242,49	253,10	262,8I	275,00	
18. CaCO <sub>3</sub>	44,00	60,10	86,9I	II0,05	I80,00	-	-	
19. CaO	I6,40	23,90	37,20	47,9I	57,12	64,70	74,80	
20. Ca(OH) <sub>2</sub>	34,00	49,12	72,00	-	-	-	-	
21. CaSO <sub>4</sub>	47,90	67,22	98,70	I26,00	I49,10	I7I,0I	200,00	
22. CaSiO <sub>3</sub>	35,30	50,80	77,70	I0I,10	I2I,00	I38,00	I6I,04	
23. Cu <sub>2</sub> O	57,5I	7I,40	93,20	III,00	I26,04	I38,0I	-	
24. CuO	I8,90	26,90	40,30	5I,50	60,90	-	-	
25. Cu <sub>2</sub> S O <sub>4</sub>	52,9I	72,70	I05,00	I32,00	-	-	-	
26. FeO	2I,80	32,30	48,70	6I,50	72,2I	8I,50	-	
27. Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	66,40	92,80	I40,05	I82,00	2I8,00	-	-	
28. Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	37,60	55,2I	86,90	II4,05	I38,95	-	-	

№ пп	$(H_f^\circ - H_f^\circ)$ , кДж/моль при T, К							$\frac{\Delta H_{f,g}^\circ}{\text{кДж}}$ моль
	298	400	600	800	1000	1200	1500	
1.	4,60	7,07	I2,43	I8,45	35,28	4I,08	-	0,00
2.	I,05	2,10	5,03	8,70	I2,83	I7,27	24,32	0,00
3.	5,92	8,62	I4,49	I2,17	27,6I	-	-	0,00
4.	5,14	7,70	12,88	I8,32	23,93	29,74	5I,99	0,00
5.	4,52	7,15	I3,18	20,20	29,32	39,6I	50,24	0,00
6.	8,48	II,42	I7,30	23,18	29,16	35,26	44,72	0,00
7.	5,06	7,63	I3,09	I8,99	-	-	-	0,00
8.	8,67	II,64	I7,56	23,72	30,13	36,77	47,06	0,00
9.	8,68	II,67	I7,92	24,52	3I,39	38,4I	49,29	0,00
10.	6,66	8,9I	I3,60	I8,0I	22,33	-	-	0,00
II.	8,96	I2,34	I9,40	26,70	34,00	4I,37	52,58	I28,23
12.	3,23	5,40	I0,09	I5,06	20,20	25,52	-	0,00
13.	5,73	8,37	I3,89	26,85	33,67	-	-	0,00
I4.	I0,04	I9,08	40,45	63,66	87,63	II2,40	I50,88	-I660,00
I5.	8,67	II,63	I7,6I	23,84	30,35	37,10	47,52	-II3,81
I6.	9,37	I8,36	22,27	32,17	42,76	53,83	7I,II	-393,15
I7.	I0,66	I5,52	25,94	37,12	48,74	60,55	78,60	I15,9I
I8.	I4,60	23,60	44,00	67,32	9I,82	-	-	-I200,00
I9.	7,03	II,60	I2,30	3I,37	4I,40	52,00	68,06	-632,00
20.	I3,60	23,07	45,26	-	-	-	-	-977,20
2I.	I7,60	28,30	5I,16	79,60	II2,95	I48,50	207,06	-I420,10
22.	I4,0I	23,34	44,3I	68,00	92,60	II8,42	I56,10	-I580,00
23.	I3,0I	20,00	34,90	50,78	67,50	84,90	-	-I65,00
24.	7,40	II,96	I2,80	32,54	43,80	-	-	-I53,00
25.	I8,07	28,78	52,24	76,84	-	-	-	-761,10
26.	9,58	I4,89	25,85	37,10	48,75	60,55	-	-267,00
27.	23,94	40,15	79,70	I24,02	I7I,75	-	-	-III0,00
28.	I5,64	26,85	52,87	82,74	II4,60	-	-	-816,00

№ пп	Речовина	$(-\frac{G_f^o - H_f^o}{T})$ , кДж/моль·К при Т, К						
		298	400	600	800	1000	1200	1500
29.	FeS	32,32	43,91	65,90	94,47	105,00	-	-
30.	FeS <sub>2</sub>	20,59	31,40	49,60	-	-	-	-
31.	H <sub>2</sub> O	155,50	166,10	178,93	188,84	196,74	204,00	213,10
32.	H <sub>2</sub> S	172,30	183,20	196,07	206,35	214,65	221,90	231,00
33.	MgO	9,21	15,10	26,00	35,32	43,28	50,20	59,20
34.	MgSiO <sub>3</sub>	29,80	42,81	67,20	88,57	107,04	124,10	145,00
35.	NH <sub>3</sub>	158,98	170,00	183,30	194,46	203,65	211,82	222,97
36.	N <sub>2</sub> O	188,04	197,94	213,00	223,90	234,12	241,98	230,89
37.	N <sub>2</sub>	179,82	190,04	201,23	210,07	217,00	224,00	231,12
38.	N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	205,81	216,58	230,85	242,25	251,70	261,20	270,84
39.	SO <sub>2</sub>	212,71	225,00	238,95	250,87	260,67	268,91	280,00
40.	SO <sub>3</sub>	217,40	230,00	248,20	263,50	276,25	285,10	300,72
41.	SiO <sub>2</sub>	18,61	26,52	40,71	53,20	64,40	74,30	87,00
42.	ZnO	20,60	28,00	41,21	51,70	60,45	68,50	78,50
43.	ZnS	28,61	38,00	52,87	65,12	75,12	83,60	
Органічні сполуки								
44.	CH <sub>4</sub>	152,60	162,78	177,46	189,26	199,81	209,00	222,01
45.	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	167,23	177,90	193,77	206,69	217,56	227,90	240,10
46.	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	184,00	195,00	212,18	226,79	239,77	251,20	268,70
47.	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	189,37	203,00	222,12	239,70	255,66	270,00	291,80
48.	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> (г.)	221,43	237,80	266,56	294,34	320,41	345,10	378,90
49.	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> (г.)	238,72	259,50	296,92	334,74	371,38	408,00	457,00
50.	CH <sub>3</sub> OH(г.)	201,34	213,00	230,61	245,04	257,65	271,00	290,10
51.	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH(г.)	234,97	245,00	274,42	295,65	314,76	332,50	358,10

№ пп	$(H_f^o - H_f^o)$ , кДж/моль при Т, К							$\Delta H_{f,o}^o$ , кДж/ моль
	298	400	600	800	1000	1200	1500	
29.	10,45	17,10	32,90	44,40	56,40	68,85	-	-96,01
30.	9,54	15,98	29,80	-	-	-	-	-174,00
31.	9,91	13,34	20,41	27,93	35,95	44,40	58,09	-288,91
32.	9,96	13,51	20,98	29,17	38,05	47,00	61,80	-17,68
33.	5,27	9,24	17,85	27,23	37,15	47,33	63,04	-598,00
34.	11,33	20,24	40,88	63,40	87,13	III,56	I49,12	-1490,00
35.	10,04	13,80	22,20	31,80	42,60	54,00	73,05	-39,22
36.	9,58	13,72	22,90	33,10	44,00	55,42	73,20	85,00
37.	9,18	12,24	18,33	24,74	31,41	38,32	48,91	90,15
38.	10,21	14,18	22,85	32,55	42,85	53,60	73,02	36,50
39.	10,55	14,75	24,09	34,25	44,95	55,70	72,30	-294,36
40.	11,74	17,20	29,85	44,05	59,00	71,24	92,14	-391,44
41.	6,94	11,95	23,90	37,60	52,30	66,43	88,10	-854,00
42.	7,04	11,40	20,75	31,00	41,40	52,10	68,80	-345,00
43.	8,66	13,50	24,00	34,80	45,55	58,00	-	-201,00
44.	10,03	13,90	23,25	34,88	48,52	63,50	88,50	-66,89
45.	10,01	14,80	25,66	37,67	50,59	64,25	85,90	227,81
46.	10,56	15,50	28,17	43,86	61,81	81,40	II3,40	60,78
47.	11,95	18,00	33,58	53,37	76,51	102,20	I44,50	-69,11
48.	14,23	24,10	51,43	86,28	I26,24	I69,80	240,00	I00,41
49.	17,73	30,75	68,69	II9,44	I79,32	245,50	353,25	-83,75
50.	II,43	16,40	28,17	42,89	59,84	90,32	I40,00	-I90,10
51.	I4,18	23,40	40,66	64,18	91,08	I25,00	I74,00	-217,13

Таблиця Д.9

Температурні функції ( $M_n$ ) для розрахунків термодинамічних величин по рівнянню Тьюмкіна-Шварциана

$T, K$	$M_0$	$M_1 \cdot 10^{-3}$	$M_2 \cdot 10^{-6}$	$M_{-2} \cdot 10^5$
298	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
300	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
400	0,0392	0,0130	0,0043	0,0364
500	0,1133	0,0407	0,0149	0,0916
600	0,1962	0,0759	0,0303	0,1423
700	0,2794	0,1153	0,0498	0,1853
800	0,3597	0,1574	0,0713	0,2213
900	0,4361	0,2012	0,1004	0,2521
1000	0,5088	0,2463	0,1134	0,2783
1100	0,5765	0,2922	0,1652	0,2988
1200	0,6410	0,3389	0,2029	0,3176
1300	0,7019	0,3860	0,2440	0,3340
1400	0,7595	0,4336	0,2886	0,3484
1500	0,8141	0,4814	0,3362	0,3610
1600	0,8665	0,5296	0,3877	0,3723
1700	0,9162	0,5780	0,4424	0,3824
1800	0,9635	0,6265	0,5005	0,3915
1900	1,0090	0,6752	0,5619	0,3998
2000	1,0525	0,7245	0,6260	0,4072
2100	1,0940	0,7730	0,6948	0,4140

## Література

- А.Г.Стромберг, Д.П.Сеиченко. Фізична хімія.- М.: Вища шк., 1988.- 496 с.
- О.А.Шуховицький, Л.О.Шварцман. Фізична хімія.-М.: Металургія, 1987. - 688 с.
- К.В.Кісельова, Г.С.Каретников, І.В.Кудрямов. Збірник прикладів та задач з фізичної хімії.-М.: Вища шк., 1983.-456 с.
- О.М.Крестовников, В.Н.Вігодович. Хімічна термодинаміка. - М.: Металургія, 1973.- 256 с.
- О.И.Картумінська, Х.А.Лельчук, А.Г.Стромберг. Збірник задач з хімічної термодинаміки.- М.: Вища шк., 1973.- 224 с.
- Короткий довідник фізико-хімічних величин/Під ред. А.А.Равделя, А.М.Пономарєвої.-Л.:Хімія, 1983.- 232 с.

## Вміст

## Стр.

Вступ . . . . .	3
1. Закони ідеальних газів . . . . .	4
2. Перший закон термодинаміки . . . . .	7
3. Теплоємкість. Теплота нагрівання . . . . .	11
4. Термохімія. Тепловий ефект реакції . . . . .	16
5. Другий закон термодинаміки . . . . .	23
6. Термодинамічні потенціали. Хімічна спорідненість	28
7. Хімічна рівновага. Константа рівноваги . . . . .	34
Додаток . . . . .	40
Література . . . . .	67