

МІНІСТЕРСТВО ОХОРОНИ ЗДОРОВ'Я УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ МЕДИКО-ФАРМАЦЕВТИЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ  
КАФЕДРА ФІЗКОЛОЇДНОЇ ТА АНАЛІТИЧНОЇ ХІМІЇ



Фізична та колоїдна хімія  
**ФАЗОВІ РІВНОВАГИ**

Методичний посібник з дисципліни для викладачів

Запоріжжя

2026

УДК 544(072)

Ф50

*Затверджено на засіданні Центральної методичної Ради ЗДМФУ та  
рекомендовано для використання в освітньому процесі  
(протокол № 3 від « 26 » лютого 2026 р.)*

**Автори:**

*А.Г. Каплаушенко, А.І. Авраменко, Ю.Г. Самелюк, Д.В. Довбня,  
Д.Л. Усенко*

**Рецензенти:**

*Б.С. Бурлака* – професор кафедри технології ліків Запорізького державного медико-фармацевтичного університету, д-р фарм. наук, професор;

*Р.О. Щербина* – професор кафедри токсикологічної та неорганічної хімії Запорізького державного медико-фармацевтичного університету, д-р фарм. наук, професор.

**Фізична та колоїдна хімія. Фазові рівноваги:** методичний Ф50 посібник для викладачів спеціальності І8 «Фармація» та «Технологія парфумерно-косметичних засобів» / А.Г. Каплаушенко, А.І. Авраменко, Ю.Г. Самелюк [та ін]. – Запоріжжя : [ЗДМФУ], 2026. – 116 с.

Навчально-методичний посібник складено відповідно до програми з фізичної та колоїдної хімії для проведення занять зі студентами вищих фармацевтичних навчальних закладів III-IV рівнів акредитації для спеціальностей І8 «Фармація» та «Технологія парфумерно-косметичних засобів» затвердженої наказом МОН. Методичний посібник побудовано виходячи із загальних тем фізичної та колоїдної хімії.

Методичний посібник призначений для використання при веденні занять з дисципліни «Фізична та колоїдна хімія»

**УДК 544(072)**

© Каплаушенко А.Г., Авраменко А.І.,  
Самелюк Ю.Г., Довбня Д.В., Усенко Д.Л.,  
2026

©Запорізький державний медико-фармацевтичний університет, 2026

## ЗМІСТ

<b>ПЕРЕДМОВА</b> .....	5
<b>АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ</b> .....	7
<b>НАВЧАЛЬНА МЕТА ЗАНЯТТЯ № 1</b> .....	9
<b>ВИХОВНА МЕТА</b> .....	11
<b>МІЖПРЕДМЕТНА ІНТЕГРАЦІЯ</b> .....	12
<b>ЗМІСТ НАВЧАЛЬНОГО МАТЕРІАЛУ</b> .....	14
<b>АЛГОРИТМ ВИКОНАННЯ ПРАКТИЧНИХ РОБІТ</b> .....	17
<b>ПРИКЛАДИ ВИРІШЕННЯ ЗАВДАНЬ</b> .....	21
<b>ЗАДАЧІ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО РІШЕННЯ</b> .....	28
<b>НАВЧАЛЬНА МЕТА ЗАНЯТТЯ №2</b> .....	31
<b>ВИХОВНА МЕТА</b> .....	33
<b>МІЖПРЕДМЕТНА ІНТЕГРАЦІЯ</b> .....	34
<b>ЗМІСТ НАВЧАЛЬНОГО МАТЕРІАЛУ</b> .....	36
<b>ПЛАН ТА ОРГАНІЗАЦІЙНА СТРУКТУРА ЗАНЯТТЯ</b> .....	38
<b>ПРИКЛАДИ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧ</b> .....	40
<b>ЗАДАЧІ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО ВИРІШЕННЯ</b> .....	45
<b>ТЕСТОВИЙ КОНТРОЛЬ</b> .....	46
Фазові переходи першого та другого родів .....	74
Рівняння Клапейрона-Клаузіуса.....	76
Термодинамічні умови фазової рівноваги. ....	80
Правило фаз.....	80
<b>ФАЗОВА РІВНОВАГА В ОДНО- ТА ДВОКОМПОНЕНТНИХ СИСТЕМАХ</b> .....	85
Фазова рівновага в однокомпонентних системах. Діаграма стану води .....	85
Двокомпонентні системи. Поняття про фізико-хімічний аналіз.....	89
Діаграми стану найпростіших двокомпонентних систем.....	93
Системи з евтектикою .....	94
Системи з конгруентно плавкою хімічною сполукою.....	96
Системи з інконгруентно-плавкою хімічною сполукою .....	97
Системи з твердими розчинами .....	99

Система з обмеженою розчинністю в рідкій фазі .....	102
<b>Приклади розбору діаграм .....</b>	<b>108</b>
<b>РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА .....</b>	<b>113</b>

## ПЕРЕДМОВА

Речовини, що входять до складу будь-яких термодинамічних систем, залежно від зовнішніх умов (температури, тиску, складу) можуть перебувати у різних агрегатних станах і формувати одну або декілька фаз. Сукупність знань про умови існування, співіснування та перетворення фаз становить зміст учення про фазові рівноваги, яке є одним із фундаментальних розділів фізичної та колоїдної хімії.

Для фармацевтичної науки і практики вчення про фазові рівноваги має надзвичайно важливе прикладне значення. Воно лежить в основі оптимізації умов синтезу, виділення та очищення лікарських речовин, процесів кристалізації, рекристалізації, сублімації, екстракції та сушіння. Знання фазових діаграм дозволяє раціонально підбирати умови отримання фармацевтичних субстанцій із заданими фізико-хімічними властивостями, контролювати їх поліморфний стан, стабільність і ступінь чистоти.

Особливо важливими є положення фазових рівноваг при розробці та виробництві лікарських і парфумерно-косметичних засобів. Вони використовуються для вибору оптимального складу основ м'яких лікарських форм, емульсій, суспензій, кремів і гелів, оцінювання сумісності інгредієнтів у багатокомпонентних системах, а також для обґрунтування умов зберігання готових препаратів. У практиці фармацевтичного аналізу фазові переходи застосовують для ідентифікації речовин і визначення їхньої чистоти за температурою плавлення та характером фазових перетворень.

Навчально-методичний посібник охоплює основні поняття та визначення вчення про фазові рівноваги, подає класифікацію фаз і компонентів, розглядає діаграми стану однокомпонентних систем на прикладі води, типи кривих охолодження та нагрівання. Значну увагу приділено аналізу діаграм плавкості двокомпонентних систем із простою евтектикою, систем із утворенням хімічних сполук, а також діаграм стану з повною розчинністю компонентів у рідкому та твердому станах.

Авторами детально розглянуто фігуративні точки, принципи їх побудови та інтерпретації, що дає змогу студентам правильно аналізувати фазові діаграми та робити обґрунтовані висновки щодо складу і стану системи за заданих умов. Окремо подано пояснення закономірностей розподілу речовини між двома нерозчинними або обмежено розчинними розчинниками, що має важливе значення для процесів екстракції біологічно активних сполук (алкалоїдів, глікозидів, ефірних олій, антибіотиків).

Матеріал посібника ілюстровано конкретними прикладами з фармацевтичної практики, усі процеси, що супроводжують фазові перетворення, наведено з термодинамічним обґрунтуванням і поясненням їх прикладного значення.

Даний навчально-методичний посібник призначений для викладачів і студентів спеціальностей «Фармація» та «Технологія парфумерно-косметичних засобів» і може бути використаний при вивченні дисципліни «Фізична та колоїдна хімія» під час аудиторних занять, самостійної роботи студентів і підготовки до підсумкового контролю.

## АКТУАЛЬНІСТЬ ТЕМИ

Вчення про фазові рівноваги є одним із фундаментальних розділів фізичної та колоїдної хімії, який має важливе теоретичне та прикладне значення для сучасної фармації і технології парфумерно-косметичних засобів. Практично всі процеси, що відбуваються під час створення, виробництва, аналізу та зберігання лікарських і косметичних препаратів, пов'язані з фазовими перетвореннями та рівновагою між різними агрегатними станами речовини.

Знання закономірностей фазових рівноваг дозволяє глибше зрозуміти умови існування речовин у твердому, рідкому та газоподібному станах, передбачати напрям і характер фазових переходів, а також цілеспрямовано керувати ними. Це є особливо важливим при виборі оптимальних умов синтезу та очищення фармацевтичних субстанцій, процесів кристалізації та рекристалізації, екстракції біологічно активних речовин, сушіння, стабілізації та зберігання лікарських форм.

Актуальність теми зумовлена також широким застосуванням фазових діаграм у фармацевтичній практиці. Аналіз діаграм стану однокомпонентних і багатокомпонентних систем дає змогу оцінювати сумісність інгредієнтів у складних лікарських формах, обґрунтовувати склад основ мазей, кремів, гелів, емульсій і суспензій, а також прогнозувати фізичну та хімічну стабільність препаратів у процесі зберігання.

Особливе значення вчення про фазові рівноваги має для контролю якості лікарських засобів. Температура плавлення, характер фазових переходів, наявність евтектичних сумішей і поліморфних модифікацій широко використовуються для ідентифікації речовин, визначення ступеня їх чистоти та встановлення відповідності фармакопейним вимогам.

Таким чином, вивчення теми «Фазові рівноваги» є необхідною складовою професійної підготовки майбутніх фахівців фармацевтичного та парфумерно-косметичного профілю. Засвоєння цього розділу формує у

студентів системне розуміння фізико-хімічних процесів, що лежать в основі створення ефективних, безпечних і стабільних лікарських та косметичних засобів, а також забезпечує наукове підґрунтя для подальшого вивчення спеціальних і технологічних дисциплін.

## НАВЧАЛЬНА МЕТА ЗАНЯТТЯ № 1

Метою заняття є формування у студентів системного уявлення про фазові рівноваги як один із фундаментальних розділів фізичної та колоїдної хімії, а також набуття теоретичних знань і практичних навичок, необхідних для професійної діяльності у галузі фармації та технології парфумерно-косметичних засобів.

*У процесі вивчення теми студенти повинні:*

- засвоїти основні поняття та терміни вчення про фазові рівноваги, зокрема такі як фаза, компонент, фазові переходи, число ступенів свободи системи;
- опанувати теоретичні основи фазових рівноваг у багатокомпонентних системах;
- навчитися застосовувати правило фаз Гіббса для аналізу стану термодинамічних систем та розв'язування розрахункових і ситуаційних задач;
- сформувати практичні навички роботи з лабораторним обладнанням, зокрема ділильними воронками, під час проведення процесів екстракції;
- набути вмінь аналізувати експериментальні дані та оцінювати достовірність отриманих результатів вимірювань і розрахунків;
- закріпити навчальний матеріал шляхом виконання тестових завдань і практичних вправ за темою заняття.

*Студент повинен знати:*

- класифікацію та види фазових переходів (першого і другого роду);

- типи фазових діаграм однокомпонентних і двокомпонентних систем та принципи їх аналізу;
- сутність і практичне значення правила фаз Гіббса;
- фізико-хімічні основи процесів екстракції та розподілу речовин між двома рідкими фазами.

*Студент повинен вміти:*

- аналізувати діаграми плавкості та визначати склад лікарських сумішей на їх основі;
- виконувати процес рідинно-рідинної екстракції з використанням ділильної воронки;
- визначати та розраховувати коефіцієнт розподілу речовини між двома нерозчинними рідинами;
- оцінювати точність і достовірність експериментальних результатів, робити обґрунтовані висновки за результатами досліджень.

## ВИХОВНА МЕТА

Виховна мета заняття полягає у формуванні в студентів наукового світогляду та відповідального ставлення до професійної діяльності шляхом усвідомлення ролі фазових рівноваг у фармацевтичній науці й практиці.

*У процесі проведення заняття передбачається:*

- формування системного та логічного мислення щодо аналізу фазових рівноваг у хімічних і біофармацевтичних системах;
- розвиток уміння користуватися навчальною, довідковою та науковою літературою, працювати з діаграмами стану, таблицями та нормативними даними;
- виховання навичок самостійного розв'язання теоретичних, розрахункових і ситуаційних задач, пов'язаних із фазовими переходами та рівноважними системами;
- формування відповідального ставлення до точності експериментальних досліджень, правильного ведення лабораторних записів;
- розвиток здатності грамотно аналізувати отримані експериментальні результати, робити науково обґрунтовані висновки та коректно оформляти результати досліджень відповідно до вимог навчального процесу.

## МІЖПРЕДМЕТНА ІНТЕГРАЦІЯ

Дисципліни	Знати	Вміти
<b>Попередні:</b> Фізика	Молекулярно-кінетичну теорію, основи теорії теплових процесів.	Визначати властивості системи, що складається з безлічі частинок.
Неорганічна хімія	Загальні поняття фізико-хімічної теорії розчинів. Загальні поняття швидкості хімічних реакцій. Типи реакцій за швидкістю їх проходження. Фактори, які впливають на швидкість хімічних реакцій. Стан рівноваги хімічних реакцій і його зміщення. Принцип Ле - Шательє.	Вирішувати завдання, пов'язані з хімічною рівновагою.
<b>Подальші</b> Технологія лікарських та парфумерно-косметичних препаратів, Фармацевтична хімія	Діаграми стану.	Підбирати таке співвідношення компонентів при якому лікарські форми не будуть розшаровуватися і не утворювати осад. Проводити перегонку, перекристалізацію, екстракцію та інші види очистки й розділення

		речовин.
--	--	----------

## ЗМІСТ НАВЧАЛЬНОГО МАТЕРІАЛУ

1. *Фазові переходи першого та другого роду.* Поняття фазового переходу. Класифікація фазових переходів за зміною термодинамічних функцій. Характеристика фазових переходів першого роду (плавлення, кристалізація, випаровування, конденсація, сублімація) та другого роду. Теплові ефекти фазових переходів, стрибкоподібні й безперервні зміни властивостей системи.

2. *Рівняння Клапейрона–Клаузіуса.* Виведення рівняння Клапейрона–Клаузіуса та його фізичний зміст. Застосування рівняння для опису рівноваги між фазами. Залежність тиску насиченої пари від температури. Практичне значення рівняння Клапейрона–Клаузіуса у фармацевтичній хімії та технології лікарських засобів.

3. *Правило фаз Гіббса.* Формулювання правила фаз Гіббса. Поняття числа компонентів, фаз та ступенів свободи. Аналіз фазових систем різної складності. Застосування правила фаз для інтерпретації фазових діаграм та розв'язання практичних задач.

4. *Фазова рівновага в однокомпонентних системах.* Характеристика однокомпонентних систем. Діаграма стану води: основні області існування фаз, фазові переходи, потрійна точка, критична точка. Практичне значення діаграми стану води для фармацевтичних і біохімічних процесів.

5. *Двокомпонентні системи.* Класифікація двокомпонентних систем. Діаграми плавкості з простою евтектикою. Системи з утворенням хімічної сполуки. Системи з повною та обмеженою розчинністю компонентів у рідкому й твердому стані. Практичне використання діаграм стану двокомпонентних систем у фармації та парфумерно-косметичній технології.

## ПЛАН ТА ОРГАНІЗАЦІЙНА СТРУКТУРА ЗАНЯТТЯ

№ з/п	Етапи заняття	Час	Види контролю	Способи навчання
1	Підготовчий етап	10%		Підручники, лекції, навчально-методичні посібники, тести, комп'ютери, лабораторне обладнання.
1а	Організаційні заходи	1 хв		
1б	Постановка навчальної мети та мотивацій	5 хв		
1в	Контроль початкового рівня знань	7 хв.	Усне опитування	
2	Основний етап	80%		
2а	Визначення складу лікарських сумішей по діаграмі плавкості	20 хв.	Послідовність виконання лабораторної роботи, фіксування результатів досліджу.	Підручники, лекції, навчально-методичні посібники, протокол лабораторної роботи, комп'ютери, лабораторне обладнання.
2б	Визначення коефіцієнту розподілу	20 хв.	Послідовність виконання лабораторної роботи, фіксування результатів досліджу.	

2д	Вирішення задач	10 хв.	Усне опитування.	Підручники, лекції, навчально-методичні посібники, тести.
2е	Контроль кінцевих знань	22 хв.	Усне опитування.	Підручники, лекції, навчально-методичні посібники.
3	Заключний етап	10%		
3а	Перевірка та підпис протоколів лабораторних робіт	2 хв.		
3б	Аналіз успішності студента на занятті	5 хв.	Оголошується загальна оцінка студента.	
3в	Інформування студентів про тему наступного заняття. Завдання для самостійної роботи	2 хв		

# АЛГОРИТМ ВИКОНАННЯ ПРАКТИЧНИХ РОБІТ

## Лабораторна робота №1

### Визначення складу лікарських сумішей за діаграмою плавкості

**Тема:** Термодинаміка фазових рівноваг двокомпонентні системи.

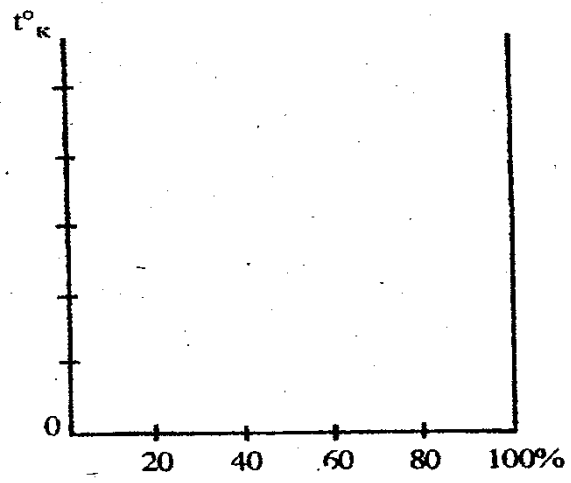
**Мета:** Вивчити метод термічного аналізу на прикладі суміші нафталін - дифеніламін.

#### Методика експерименту:

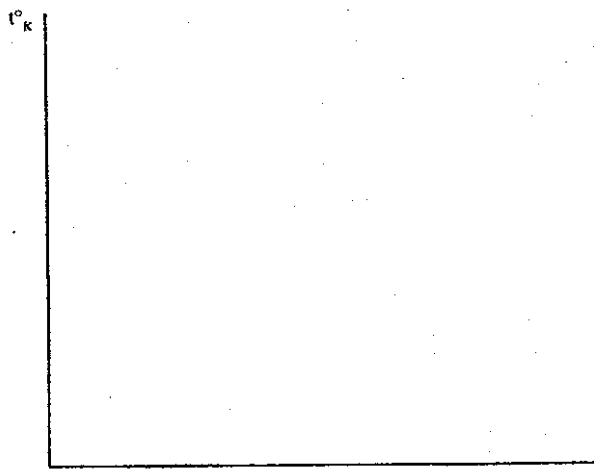
- 1) Включити водяну баню в мережу.
- 2) Опустити в баню 2-3 пробірки, що містить досліджувану суміш і забезпечені термометром.
- 3) Відмітити температуру плавлення суміші в пробірках.
- 4) Вийняти пробірки з водяної бані і фіксувати температуру досліджуваної суміші через кожні 30 сек.
- 5) Відмітити температуру появи перших кристалів, знявши додатково після цього 5-6 значень температури після початку кристалізації.
- 6) За результатами виміру побудувати криві охолодження, скориставшись наступним співвідношенням компонентів у бінарній суміші:

№ пробірки	1	2	3	4	5	6	7
нафталін	5	4	3	2	1	0	X
дифеніламін	0	1	2	3	4	5	X

- 7) Побудувати діаграму плавкості:



Криві охолодження:



**Зробити висновок.**

## Лабораторна робота №2

### Визначення коефіцієнта розподілу

**Тема:** *Екстракція. Закон розподілу.*

**Мета:** *Вивчити розподіл речовин між двома незмішуваними рідинами.*

**Завдання для самопідготовки:**

*Під час самостійної підготовки до заняття студент повинен засвоїти теоретичні основи та практичні аспекти процесів екстрагування, зокрема:*

- Розуміти суть закону розподілу Нернста між двома взаємно нерозчинними (або обмежено змішуваними) фазами та його термодинамічне обґрунтування.
- Знати форми вираження коефіцієнта розподілу залежно від агрегатного стану речовини, її іонізації, асоціації або дисоціації в кожному з середовищ.
- Уміти розраховувати кількість речовини, що переходить з однієї фази в іншу при одноразовому та багатократному екстрагуванні, з урахуванням об'ємів фаз і значення коефіцієнта розподілу.
- Оцінювати ефективність екстрагування та порівнювати одноразове й багаторазове екстрагування з точки зору повноти вилучення речовини.
- Знати основні напрями застосування процесів екстрагування у фармації, зокрема під час виділення лікарських речовин із рослинної сировини, очищення фармацевтичних субстанцій, концентрування біологічно активних сполук і контролю якості лікарських форм.

*Методика експерименту:*

- 1) Перевірити герметичність ділільних воронок. Протерти крани і змастити їх вазеліном.

2) У ділильні воронки (їх повинно бути не менше трьох) налити по 50 мл дистильованої води (мірним циліндром) і по 5 мл йоду у бензолі різних концентрацій (піпеткою).

3) Ділильні воронки щільно закрити пробками і струшувати впродовж 15 хв.

4) Через 30 хв. Після закінчення струшування вчасно повного розшарування системи злити нижній (водний) шар, відкривши спочатку пробку, а потім кран ділильної воронки.

5) Методом об'ємного титрування визначити концентрацію йоду у водному і бензольному шарі. Для титрування водного шару використати 15 мл розчину, бензольного – 1 мл розчину. Титрування здійснювати 0,01н розчином тіосульфату натрію, індикатор 2-3 краплі крохмалю.

6) Результати експерименту занести в таблицю:

Кількість витраченого на титрування $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ , мл						Коефіцієнт розподілу, K
Водний шар			Бензольний шар			
1	2	3	4	5	6	

**Зробити висновок.**

## ПРИКЛАДИ ВИРІШЕННЯ ЗАВДАНЬ

### Задача 1

Залежність температури плавлення нафталіну від тиску виражається рівнянням:  $t_{пл} = 80,10 + 0,0371 \cdot 10^{-5}P(\text{Па}) - 186,99 \cdot 10^{-18}P^2(\text{Па})$ .

Розрахувати зміну об'єму при плавленні 1 кг нафталіну при  $P = 1$  атм, якщо його теплота плавлення дорівнює 138,6 Дж/г.

Дано:

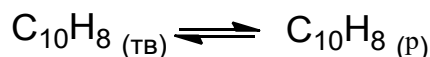
$$m_{\text{нафт.}} = 1 \text{ кг}$$

$$\Delta H_{\text{пл.}} = 138,6 \text{ Дж/г}$$

$$P = 1 \text{ атм} = 1,0133 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$\Delta V_{\text{пл.}} - ?$$

Розв'язання:



Для фазових переходів конденсованих фаз застосовується

$$\text{рівняння: } \frac{dP}{dT} = \frac{\Delta H}{T\Delta V}$$

Визначимо спочатку похідну  $\frac{dT}{dP}$ . Оскільки:  $T = t + 273,15$ ;  $\frac{dT}{dP} = \frac{dt}{dP}$ ;

$$\begin{aligned} \frac{dt}{dT} &= 0,0371 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 186,99 \cdot 10^{-18} \cdot P = 0,0371 \cdot 10^{-5} - 2 \cdot 186,99 \cdot 10^{-18} \cdot 1,0133 \cdot 10^5 = \\ &= 0,0371 \cdot 10^{-5} \text{ К / Па} \end{aligned}$$

Звідки:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{dP}{dT} = (0,0371 \cdot 10^{-5})^{-1} = 2,69 \cdot 10^6 \text{ Па / К}$$

$$t_{пл} = 80,10 + 0,0371 \cdot 10^{-5} \cdot 1,0133 \cdot 10^5 - 186,99 \cdot 10^{-18} (1,0133 \cdot 10^5)^2 = 80,14^\circ \text{C}$$

$$T_{пл} = 273,15 + 80,14 = 353,29 \text{ К}$$

$$\Delta V = \frac{\Delta H}{(dP/dT) \cdot T} = \frac{138,6 \cdot 1000}{2,69 \cdot 10^6 \cdot 353,29} = 145,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 = 145,8 \text{ см}^3$$

## Задача 2

Тиск пари хлороформу при 50 °С рівний 535 мм. рт. ст., теплота випаровування хлороформу 30,836 кДж/моль. Визначити нормальну температуру кипіння хлороформу.

Дано:

$$T_1 = 50 \text{ }^\circ\text{C} = 323 \text{ К.}$$

$$P_1 = 535 \text{ мм. рт. ст.}$$

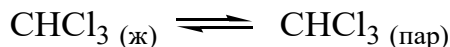
$$P_2 = 1 \text{ атм.} = 760 \text{ мм. рт. ст.}$$

$$\Delta H_{\text{вип.}} = 30,836 \text{ кДж/моль.}$$

$$T_{2 \text{ кип.}} - ?$$

*Розв'язання:*

Нормальна температура кипіння (н.т.к.) – температура кипіння при  $P = 1$  атм.



Для вирішення використовується рівняння для фазового переходу за участю газів:

$$\ln \frac{P_2}{P_1} = -\frac{\Delta H_{\text{вип.}}}{R} \left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)$$

$$\left( \frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) = -\left( \ln \frac{P_2}{P_1} \right) \frac{R}{\Delta H_{\text{вип.}}} = -\left( \ln \frac{760}{535} \right) \frac{8,31}{30,836 \cdot 10^3} = -9,46 \cdot 10^{-5}$$

$$\frac{1}{T_2} = \frac{1}{323} - 0,946 \cdot 10^{-5}$$

$$T_2 = 333 \text{ К}$$

У даному завданні теплота випаровування в даному температурному інтервалі прийнята постійною, тому було використано рівняння для  $\Delta H = \text{const}$ .

Якщо ж  $\Delta H_{\text{вип.}} = f(T)$ , треба використовувати диференціальне рівняння для знаходження  $\Delta H_{\text{вип.}}$  або  $\Delta H_{\text{в.о.з.г.}}$ . Оскільки залежності  $\ln P=f(T)$  і  $\ln K_p=f(T)$  аналогічні.

### Задача 3

Під яким тиском вода кипітиме при 363 К (90° С)? Середнє значення мольної теплоти випаровування води в інтервалі температур від 363 до 373 К дорівнює 42,72 МДж·кмоль<sup>-1</sup>.

*Розв'язання:*

Залежність тиску насиченої водяної пари від температури визначаємо за рівнянням Клаузіуса–Клапейрона:

$$\lg \frac{p_2}{p_1} = \frac{L_{\text{вип.}}(T_2 - T_1)}{2,303RT_1T_2}.$$

Розв'язавши рівняння відносно  $\lg p_{T_1}$  дістанемо рівняння для визначення тиску насиченої пари при 363 К:

$$\begin{aligned} \lg p_{363} &= \lg p_{373} - \frac{L_{\text{вип.}}(T_2 - T_1)}{2,303RT_1T_2} = \lg 1,01325 \cdot 10^5 - \frac{42,72 \cdot 10^6 (373 - 363)}{2,303 \cdot 8,314 \cdot 10^3 \cdot 373 \cdot 363} = \\ &= 5,0056 - 0,1684 = 4,8408, \end{aligned}$$

Звідки:

$$p_{363} = 6,931 \cdot 10^4 \text{ Па}$$

### Задача 4

Визначити температуру плавлення кадмію при тиску  $1,01325 \cdot 10^7$  Па. Атомна теплота плавлення кадмію дорівнює 6,11 МДж·катом<sup>-1</sup>, температура плавлення при  $1,01325 \cdot 10^5$  Па – 594,1 К, густини рідкого і твердого кадмію відповідно дорівнюють  $7,989 \cdot 10^3$  і  $8,366 \cdot 10^3$  кг·м<sup>-3</sup>.

*Розв'язання:*

Атомні об'єми твердого і рідкого кадмію знайдемо з рівнянь:

$$V_T = \frac{112,4}{8,366 \cdot 10^3} = 0,0134 \text{ м}^3 \cdot \text{катом}^{-1};$$

$$V_{\text{рід}} = \frac{112,4}{7,989 \cdot 10^3} = 0,0141 \text{ м}^3 \cdot \text{катом}^{-1}.$$

Підвищення температури плавлення кадмію при збільшенні тиску від  $1,01325 \cdot 10^5$  до  $1,01325 \cdot 10^7$  Па обчислимо, підставивши значення величин у рівняння:

$$\Delta T = \frac{\Delta p T (V_{\text{рід}} - V_T)}{L_{\text{пл}}} = \frac{(1,01325 \cdot 10^7 - 1,01325 \cdot 10^5)(0,0141 - 0,0134)}{6,11 \cdot 10^6} = 0,688 \text{ К}.$$

Температура плавлення кадмію при тиску  $1,01325 \cdot 10^7$  Па дорівнює:

$$T = T_0 + \Delta T = 594,1 + 0,69 = 594,79 \text{ К}.$$

## Задача 5

### *Застосування правила фаз Гіббса*

Визначити число ступенів свободи однокомпонентної системи, що перебуває у рівновазі між двома фазами (рідина – пара).

*Розв'язання:*

Згідно з правилом фаз Гіббса:

$$F = C - P + 2 \quad F = C - P + 2$$

де: F – число ступенів свободи;

C – кількість компонентів;

P – кількість фаз.

Для даної системи:

$$C=1, P=2$$

$$F=1-2+2=1$$

*Висновок:* система має один ступінь свободи, тобто для визначення її стану достатньо задати один параметр (температуру або тиск).

### **Задача 6**

*Визначення числа ступенів свободи в точці потрібної рівноваги*

Визначити число ступенів свободи однокомпонентної системи в точці потрібної рівноваги (тверда фаза – рідина – пара).

*Розв'язання:*

$$C=1, P=3$$

$$F=1-3+2=0$$

*Висновок:* система інваріантна – температура і тиск мають строго фіксовані значення.

### **Задача 7**

*Закон розподілу Нернста*

Речовина розподіляється між водною та органічною фазами. Концентрація у водній фазі становить 0,2 моль/л, в органічній – 1,0 моль/л. Визначити коефіцієнт розподілу.

*Розв'язання:*

Закон розподілу Нернста:

$$K=C_{\text{вод}}/C_{\text{орг}}$$

$$K=1,0/0,2=5$$

*Висновок:* коефіцієнт розподілу дорівнює 5, що свідчить про переважний перехід речовини в органічну фазу.

## Задача 8

### *Багатократне екстрагування*

У водному розчині об'ємом 100 мл міститься 1,0 г речовини. Коефіцієнт розподілу між органічним розчинником і водою дорівнює 4. Об'єм органічної фази – 50 мл. Визначити масу речовини, що залишиться у водній фазі після одного екстрагування.

### *Розв'язання:*

Частка речовини, що залишається у водній фазі:

$$q = \frac{V_{\text{вод}}}{V_{\text{вод}} + K \cdot V_{\text{орг}}}$$
$$q = \frac{100}{100 + 4 \cdot 50} = \frac{100}{300} = 1/3$$
$$m_{\text{зал}} = 1,0 \cdot 1/3 = 0,33 \text{ г}$$

*Висновок:* після одного екстрагування у водній фазі залишається 0,33 г речовини.

## Задача 9

### *Порівняння одноразового та багаторазового екстрагування*

Порівняти ефективність одноразового екстрагування 100 мл органічного розчинника і дворазового екстрагування по 50 мл кожного, якщо коефіцієнт розподілу дорівнює 3.

### *Розв'язання:*

При багаторазовому екстрагуванні частка речовини, що залишається у водній фазі, кожного разу зменшується, тому дворазове екстрагування є ефективнішим, ніж одноразове з тим самим сумарним об'ємом розчинника.

*Висновок:* у фармацевтичній практиці доцільніше застосовувати багатократне екстрагування.

## **Задача 10**

### *Аналіз фазової діаграми*

За діаграмою плавкості двокомпонентної системи з простою евтектикою визначити фазовий склад системи при температурі нижче евтектичної точки.

### *Розв'язання:*

За температури нижче евтектичної точки система складається з двох твердих фаз, що відповідають кожному з компонентів.

*Висновок:* система перебуває у двофазному твердому стані.

## ЗАДАЧІ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО РІШЕННЯ

1. Тиск водяної пари при 298 К дорівнює 3167,2 Па. Визначити середнє значення теплоти випаровування води в інтервалі температур від 298 до 373 К.

2. Температура кипіння цинку при тиску  $1,01325 \cdot 10^5$  Па дорівнює 1180 К. Теплота випаровування цинку  $114,84$  МДж·като $m^{-1}$ . До якої температури слід охолодити рідкий цинк, щоб тиск пари цинку знизився до  $0,5066 \cdot 10^5$  Па?

3. При тиску  $1,01325 \cdot 10^5$  Па температура кипіння етилового спирту дорівнює 351,6 К. Тиск насиченої пари спирту при 299,2 К дорівнює 7,999 кПа. Визначити теплоту випаровування етилового спирту в цьому інтервалі температур.

4. Визначити температуру кипіння води при тиску 1,01325 МПа, якщо середнє значення теплоти випаровування води в цьому інтервалі температур дорівнює  $43$  МДж·кмо $l^{-1}$ .

5. Густини рідкого і твердого вісмуту при температурі плавлення 544,2 К відповідно дорівнюють  $10,005 \cdot 10^3$  і  $9,637 \cdot 10^3$  кг·м $^{-3}$ . Атомна теплота плавлення вісмуту дорівнює  $11,01$  МДж·като $m^{-1}$ . Визначити температуру плавлення вісмуту під тиском  $5,0665 \cdot 10^8$  Па.

6. Густини рідкого і твердого олова при температурі плавлення 505,1 К відповідно дорівнюють  $6,988 \cdot 10^3$  і  $7,184 \cdot 10^3$  кг·м $^{-3}$ . Теплота плавлення олова –  $7,076$  МДж·като $m^{-1}$ . Визначити температуру плавлення олова під тиском  $1,01325 \cdot 10^7$  Па.

7. Визначити теплоту випаровування льоду при 273,15 К, якщо при цій температурі тиск насиченої водяної пари дорівнює 610 Па, а при 272,15 К – 562 Па.

8. Визначити число ступенів свободи однокомпонентної системи, що перебуває у рівновазі між: твердою і рідкою фазами; рідкою фазою і паром; трьома фазами одночасно.

9. Визначити число ступенів свободи двокомпонентної системи за наявності: однієї фази; двох фаз; трьох фаз.

10. Вказати, до якого роду (першого чи другого) належать такі фазові переходи: плавлення; кристалізація; сублімація; склування; надпровідний перехід.

11. Пояснити, як змінюються ентальпія та ентропія при фазових переходах першого роду.

12. Пояснити фізичний зміст рівняння Клапейрона–Клаузіуса та область його застосування.

13. Як зміниться температура кипіння рідини при зниженні зовнішнього тиску? Обґрунтувати відповідь з використанням рівняння Клапейрона–Клаузіуса.

14. За діаграмою стану води визначити: число фаз у різних областях діаграми; число ступенів свободи в областях одно- і двофазної рівноваги; фізичний зміст потрійної точки.

15. Пояснити аномальний характер кривої плавлення льоду.

16. За діаграмою плавкості двокомпонентної системи з простою евтектикою визначити фазовий склад системи: вище температури ліквідусу; між лініями ліквідусу і солідусу; нижче евтектичної температури.

17. Вказати практичне значення евтектичних сумішей у фармації.

18. Речовина розподіляється між водою і органічним розчинником. Концентрація у водній фазі становить 0,15 моль/л, в органічній – 0,75 моль/л. Обчислити коефіцієнт розподілу.

19. Пояснити вплив іонізації речовини на коефіцієнт розподілу.

20. У водному розчині об'ємом 100 мл міститься 2,0 г лікарської речовини. Коефіцієнт розподілу між органічним розчинником і водою дорівнює 5. Об'єм органічної фази – 50 мл. Обчислити масу речовини, що залишиться у водній фазі після одного екстрагування.

21. Порівняти ефективність одноразового екстрагування 100 мл розчинника та дворазового по 50 мл кожного при однаковому коефіцієнті розподілу.

22. Пояснити роль фазових рівноваг у процесах: виділення алкалоїдів із рослинної сировини; очищення фармацевтичних субстанцій; приготування м'яких лікарських форм.

23. Обґрунтувати вибір розчинника для екстрагування лікарської речовини з урахуванням її полярності та коефіцієнта розподілу.

## НАВЧАЛЬНА МЕТА ЗАНЯТТЯ №2

### *Мета заняття:*

- Ознайомити студентів із базовими поняттями термодинаміки фазових систем, а саме: фаза, компонент, фазові переходи, ступені свободи.
- Сформувати уявлення про теоретичні основи фазових рівноваг та умови їх досягнення.
- Забезпечити засвоєння матеріалу через практичну роботу та тестування знань щодо теми заняття.

### *Студент повинен знати:*

- Види фазових переходів – класифікація переходів речовин між різними агрегатними станами (тверда, рідка, газоподібна фаза) та їх характеристики.
- Термодинамічні умови фазової рівноваги – рівність температур, тиску та хімічного потенціалу компонентів у суміжних фазах.
- Правило фаз Гіббса – залежність числа ступенів свободи системи від кількості фаз і компонентів, що дозволяє передбачати можливі варіанти рівноваги.
- Види фазових діаграм – одно-, дво- та багатоконпонентні системи; особливості їх графічного представлення.
- Принципи побудови фазових діаграм та їх аналізу – методи визначення фазових переходів, областей стабільності фаз та точок трифазного стану.
- Області застосування фазових рівноваг – технології фармацевтичного виробництва, створення парфумерно-косметичних засобів, стабілізація емульсій та складів лікарських форм.

### *Студент повинен вміти:*

- Аналізувати фазові діаграми – визначати фазові переходи, кількість фаз у системі, ступінь свободи та прогнозувати поведінку системи при зміні зовнішніх умов (температура, тиск, концентрація компонентів).
- Інтерпретувати результати у контексті практичного застосування у фармацевтичній та косметичній технології.

## ВИХОВНА МЕТА

1. Сформувати у студентів системне розуміння явищ фазових рівноваг та їх практичне значення у фармацевтичній та косметичній технології.
2. Розвивати навички роботи з довідковою та навчальною літературою, вміння знаходити необхідну інформацію та застосовувати її на практиці.
3. Навчити самостійно вирішувати логічні та розрахункові задачі, що пов'язані з фазовими переходами та аналізом фазових діаграм.
4. Формувати вміння грамотно робити висновки на основі теоретичних знань та результатів експерименту, а також правильно оформлювати результати досліджень у вигляді таблиць, графіків та звітів.
5. Сприяти розвитку аналітичного мислення та наукової дисципліни, що є необхідними як у навчальній діяльності, так і у професійній практиці.

## МІЖПРЕДМЕТНА ІНТЕГРАЦІЯ

Дисципліни	Знати	Вміти
<p><b>Попередні:</b> Фізика</p>	<p>Молекулярно-кінетичну теорію, основи теорії теплових процесів.</p>	<p>Визначати властивості системи, що складається з безлічі частинок.</p>
<p>Неорганічна хімія</p>	<p>Загальні поняття фізико-хімічної теорії розчинів. Загальні поняття швидкості хімічних реакцій. Типи реакцій за швидкістю їх проходження. Фактори, які впливають на швидкість хімічних реакцій. Стан рівноваги хімічних реакцій і його зміщення. Принцип Ле - Шательє.</p>	<p>Вирішувати завдання, пов'язані з хімічною рівновагою.</p>
<p><b>Подальші</b> Технологія ліків та парфумерно-косметичних препаратів, Фармацевтична хімія.</p>	<p>Діаграми стану.</p>	<p>Підбирати таке співвідношення компонентів при якому лікарські форми не будуть розшаровуватися і не утворювати осад. Проводити перегонку, перекристалізацію, екстракцію та інші види очистки й розділення</p>

		речовин.
--	--	----------

## ЗМІСТ НАВЧАЛЬНОГО МАТЕРІАЛУ

Термодинамічні умови фазової рівноваги

Основні принципи досягнення рівноваги між фазами.

Рівність температури, тиску та хімічного потенціалу компонентів у суміжних фазах.

Вплив зовнішніх факторів на стабільність фазової системи.

Правило фаз (правило Гіббса)

Визначення числа ступенів свободи системи.

Залежність кількості фаз, компонентів і зовнішніх параметрів.

Приклади застосування правила для одно- та багатокомпонентних систем.

Фазова рівновага в однокомпонентних системах. Діаграма стану води

Типи фазових переходів: плавлення, кипіння, конденсація, сублімація.

Трифазна точка та критична точка.

Аналіз діаграми стану води як наочний приклад фазових рівноваг.

Поняття про фізико-хімічний аналіз

Методи дослідження фазових систем.

Визначення складу фаз та взаємодії між компонентами.

Застосування у фармацевтичній практиці для прогнозування властивостей сумішей.

Діаграми стану найпростіших двокомпонентних систем

Основні типи фазових діаграм: із повною та обмеженою розчинністю.

Аналіз структур та фазових переходів у двокомпонентних системах.

Системи з евтектикою

Поняття евтектичної суміші та її температури плавлення.

Особливості побудови та інтерпретації евтектичних діаграм.

Системи з конгруентно плавкою хімічною сполукою

Визначення конгруентно плавких сполук.

Особливості фазових діаграм та стабільності фаз.

Системи з інконгруентно-плавкою хімічною сполукою

Відмінності від конгруентно плавких сполук.

Вплив на формування фаз та діаграм.

Системи з твердими розчинами

Види твердих розчинів: замісні та вставні.

Фазові діаграми та межі розчинності.

Система з обмеженою розчинністю в рідкій фазі

Характеристика обмежено розчинних систем.

Побудова та аналіз діаграм стану.

Приклади розбору діаграм

Практичне застосування знань для аналізу реальних фазових систем.

Визначення фаз, точок евтектики, областей стабільності та прогнозування змін системи при зміні температури або складу.

## ПЛАН ТА ОРГАНІЗАЦІЙНА СТРУКТУРА ЗАНЯТТЯ

№ з/п	Етапи заняття	Час	Види контролю	Способи навчання
1	Підготовчий етап	10%		Підручники, лекції, навчально-методичні посібники, тести, комп'ютери, лабораторне обладнання
1а	Організаційні заходи	1 хв.		
1б	Постановка навчальної мети та мотивацій	5 хв.		
1в	Контроль початкового рівня знань	7 хв.	Усне опитування	
2	Основний етап	80%		Підручники, лекції, навчально-методичні посібники, комп'ютери, лабораторне обладнання
2а	Розбір теоретичного матеріалу	20 хв.	Усне опитування	
2б	Контроль кінцевих знань	20 хв.	Комп'ютерне тестування	
2в	Контроль кінцевих знань	32 хв.	Усне опитування	Підручники, лекції, навчально-методичні посібники, тести
3	Заключний етап	10%		
3а	Перевірка та підпис протоколів	2 хв.		

	лабораторних робіт			
3б	Аналіз успішності студента на занятті	5 хв.	Оголошується загальна оцінка студента	
3в	Інформування студентів про тему наступного заняття. Завдання для самостійної роботи	2 хв.		

## ПРИКЛАДИ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧ

### Задача 1

Визначити число ступенів свободи при затвердінні розплавлених:

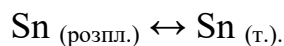
- 1) чистого олова;
- 2) сплаву з олова і свинцю, що утворює кристали свинцю;
- 3) сплаву з олова і свинцю, що утворює кристали олова і свинцю.

*Розв'язання:*

Зміна тиску майже не впливає на температуру плавлення чистих металів і сплавів. Тому для такої системи газову фазу до уваги не беруть, а враховують тільки один зовнішній фактор – температуру. Число ступенів свободи такої умовно варіантної системи обчислюють за рівнянням:

$$C_{\text{ум}} = K - \Phi + 1.$$

1) Охолодження розплавленого олова приводить до утворення твердої фази – кристалів олова. Настає рівновага однокомпонентної системи між рідкою і твердою фазами:



Число ступенів свободи такої системи:

$$C_{\text{ум}} = K - \Phi + 1. C_{\text{ум}} = K - \Phi + 1 = 1 - 2 + 1 = 0.$$

Система стає безваріантною. Тому температура кристалізації набуває строго певного значення і не змінюється, поки відбувається кристалізація олова.

До початку кристалізації і після повного затвердіння всієї маси рідкого олова число фаз системи дорівнює одиниці, система одноваріантна і має один ступінь свободи (температуру можна змінювати в певних межах, не змінюючи агрегатного стану олова).

2) У момент кристалізації свинцю з розплаву свинець – олово система складається з двох фаз: рідкої (розплав свинець – олово) і твердої (кристали свинцю). Число ступенів свободи такої двокомпонентної системи:

$$C_{\text{ум}} = 2 - 2 + 1 = 1$$

Система одноваріантна, тобто кристалізація свинцю з розплаву відбувається із зміною температури.

3) У момент кристалізації одночасно свинцю і олова з розплаву свинець-олово система складається з трьох фаз: рідкої (розплав Pb-Sn) і двох твердих (кристали олова і свинцю). Число ступенів свободи такої двокомпонентної системи:

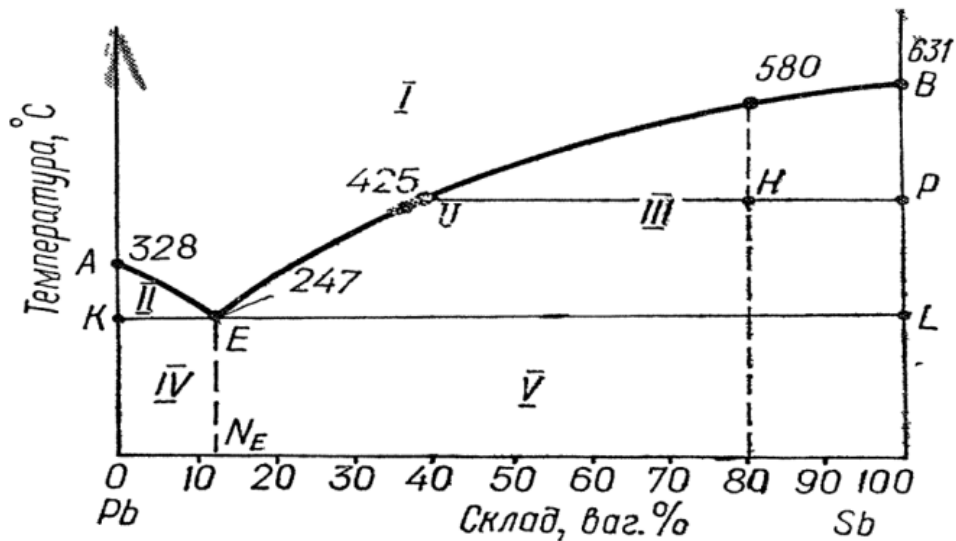
$$C_{\text{ум}} = K - \Phi + 1 = 2 - 3 + 1 = 0$$

Отже система безваріантна і затвердіння відбувається при строго певній температурі і складі системи.

## Задача 2

Користуючись правилом важеля, за діаграмою плавкості системи свинець – сурма визначити:

- 1) склад евтектичної суміші;
- 2) скільки сурми виділиться, якщо 20 кг рідкого сплаву, що містить 80 % сурми, охолодити до 425° С;
- 3) скільки кілограмів і якого металу виділиться, якщо 10 кг рідкого сплаву, що містить 90 % Pb охолодити до 247° С, тобто до утворення твердої евтектики.



1 – розплав; 2 – розплав і кристали свинцю; 3 – розплав і кристали сурми;  
 4 – евтектика і кристали свинцю; 5 – евтектика і кристали сурми.

Діаграма плавкості системи свинець – сурма

Розв'язання:

1) Перетин перпендикуляра, опущеного з точки E, з віссю абсцис, дає нам точку NE, яка відповідає евтектичній суміші, що складається з 13% Sb і 87% Pb.

2) При охолодженні рідкого сплаву, що містить 80 % Sb, перші кристали сурми утворюються при 580° С. У міру випадання кристалів сурми процентний вміст свинцю в розплаві підвищується до 60 %. При охолодженні температури кг розплав до 425° С викристалізовується  $m_{Sb}$  кг сурми. Тоді маса розплав у точці U буде:

$$m_{\text{рід.}} = m - m_{Sb}$$

Абсолютна кількість свинцю в розплаві при охолодженні не змінюється, але оскільки частина сурми виділиться з розплав у вигляді кристалів, то процентний вміст свинцю підвищиться від 20 до 60%. Співвідношення між кількістю твердої і рідкої фаз визначаємо за правилом важеля:

$$\frac{m_{\text{Sb}}}{m_{\text{рід.}}} = \frac{UH}{HP},$$

або

$$\frac{m_{\text{Sb}}}{m_{\text{рід.}} + m_{\text{Sb}}} = \frac{m_{\text{Sb}}}{m} = \frac{UH}{HP}.$$

Звідси кількість сурми, що викристалізувалася при охолодженні розплаву:

$$m_{\text{Sb}} = \frac{mUH}{UP} = \frac{20(80-40)}{100-40} = 13,33 \text{ кг.}$$

Кількість сурми, викристалізованої при охолодженні розплаву, що містить 80 % Sb, можна обчислити таким способом.

З діаграми плавкості системи Pb–Sb видно, що при охолодженні сплаву, який містить 80% Sb, до 425° С викристалізується сурма, процентний вміст свинцю підвищується в розплаві від 20 до 60 %.

У 20 кг розплаву до початку кристалізації сурми міститься свинцю:

$$m_{\text{Pb}} = \frac{m \cdot 20}{100} = \frac{20 \cdot 20}{100} = 4 \text{ кг.}$$

Кількість розплаву після кристалізації сурми:

$$m_{\text{рід.}} = \frac{100m_{\text{Pb}}}{60} = \frac{100 \cdot 4}{60} = 6,67 \text{ кг.}$$

Кількість викристалізованої при охолодженні розплаву сурми:

$$m_{\text{Sb}} = m - m_{\text{рід.}} = 20 - 6,67 = 13,33 \text{ кг.}$$

3) З діаграми плавкості системи Рb-Ві видно, що при охолодженні 10 кг розплаву, який містить 90% свинцю, до температури 247° С кристалізується свинець у кількості:

$$m_{Pb} = \frac{10(90-87)}{100-87} = 2,31 \text{ кг.}$$

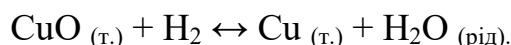
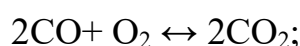
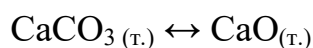
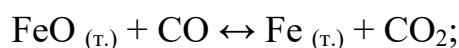
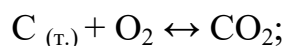
## ЗАДАЧІ ДЛЯ САМОСТІЙНОГО ВИРІШЕННЯ

1. Визначити максимальне число ступенів свободи однокомпонентної, двокомпонентної і трикомпонентної систем.

2. Визначити максимальне число фаз однокомпонентної, двокомпонентної і трикомпонентної систем.

3. Назвати фази систем, що складаються з води та кухонної солі, і визначити число ступенів вільності цих систем.

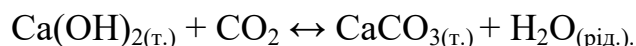
4. Визначити число незалежних компонентів і число фаз для таких систем:



5. Визначити число незалежних компонентів, число фаз і число ступенів свободи системи:



6. Визначити число незалежних компонентів, число фаз і число ступенів свободи системи:



7. У водному розчині солей аналізом виявлено такі іони:  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Cl^-$ ,  $HCO_3^-$ . Скільки компонентів у цій системі?

8. Скільки газоподібних фаз може бути в кожній ізольованій системі? Чи в кожній системі обов'язково повинна бути газоподібна фаза?

## ТЕСТОВИЙ КОНТРОЛЬ

1. Аномальні властивості води обумовлені:

- a) *\*будовою молекул і структури речовини*
- b) *закономірною зміною щільності зі зміною температури*
- c) *здатністю розчиняти неорганічні речовини*
- d) *хімічним складом молекул*
- e) *здатністю утворювати гідрофобні комплекси з деякими органічними сполуками*

2. Дифузія – це:

- a) *\*двосторонній процес в розчині, обумовлений тепловим рухом частинок розчиненої речовини і розчинника*
- b) *односторонній процес в розчині, обумовлений тепловим рухом частинок розчиненої речовини і розчинника*
- c) *двосторонній процес в розчині, обумовлений тепловим рухом частинок розчиненої речовини*
- d) *двосторонній процес в розчині, обумовлений тепловим рухом частинок розчинника*
- e) *односторонній процес в розчині, обумовлений тепловим рухом частинок розчиненої речовини*

3. Розчинність газів в рідинах підвищується:

- a) *\*при зниженні температури і підвищенні тиску*
- b) *при зниженні температури і зниженні тиску*
- c) *при підвищенні температури і підвищенні тиску*
- d) *при підвищенні температури і зниженні тиску*
- e) *при підвищенні температури*

4. Який вираз має концентрація в рівнянні закону Рауля:

- a) *\*Молярная частка*
- b) *Масова частка*
- c) *Титр*
- d) *Моляльна*
- e) *Нормальна*

5. Як взаємодіють молекули води між собою:

- a) *\*диполь-дипольна взаємодія*
- b) *ван-дер-ваальсові сили взаємодії*
- c) *іонна взаємодія*
- d) *іон-дипольна взаємодія*
- e) *молекулярна взаємодія*

6. Гіпертонічний розчин – це:

- a) *\*розчин, який має більший осмотичний тиск в порівнянні зі стандартом*
- b) *розчин, осмотичний тиск якого дорівнює 1*
- c) *розчин, який має однаковий осмотичний тиск в порівнянні зі стандартом*
- d) *розчин, який має менший осмотичний тиск в порівнянні зі стандартом*
- e) *розчин, осмотичний тиск якого не змінюється*

7. Як впливає присутність електролітів на розчинність газів в рідинах:

- a) *\*знижує розчинність*
- b) *газ в присутності електроліту взагалі не розчиняється*
- c) *не впливає*
- d) *підвищує розчинність*
- e) *розчинність залежить від ступеня дисоціації електроліту*

8. В'язкість – це:

- a) *\*внутрішнє тертя між шарами речовин (рідин або газів), які рухаються відносно один одного*
- b) *властивість, протилежна плинності*
- c) *внутрішнє тертя між шарами твердої речовини*
- d) *зовнішнє тертя між шарами рідини*

9. Точка максимуму на діаграмі плавлення, коли речовини утворюють стійке з'єднання, називається:

- a) *\*сингулярна*
- b) *евтектична*
- c) *рівноважна*
- d) *максимальна*
- e) *критична*

10. Ізотонічність - це обов'язкова вимога, яку висувають до інфузійних розчинів. Вкажіть значення, неможливе для ізотонічного коефіцієнту.

- a) *\*1*
- b) *2*
- c) *3*
- d) *4*
- e) *4,5*

11. Чому дорівнює число компонентів в точці перетину лінії ліквідусу з віссю ординат на діаграмі плавкості?

- a) *\*1*
- b) *3*
- c) *2*
- d) *0*

12. Конденсованою системою називають систему, в якій:

- a) \*відсутня газоподібна фаза
- b) відсутня тверда фаза
- c) відсутня рідка фаза
- d) компоненти знаходяться в рідкому стані
- e) є більше двох компонентів

13. Розчини, які використовуються для ін'єкцій, повинні бути ізотонічними. Ізотонічними розчинами називають такі, в яких:

- a) \*однаковий осмотичний тиск
- b) однаковий онкотичний тиск
- c) однакове рН розчинів
- d) однакова полярність молекул розчинених речовин
- e) однакова масова частка розчинених речовин

14. Більшість технологічних процесів у фармації відбувається в гетерогенних системах. Яка кількість фаз міститься в суміші евтектичного складу при евтектичній температурі двохкомпонентної системи?

- a) \*3
- b) 2
- c) 5
- d) 4
- e) 1

15. Для внутрішньовенних ін'єкцій використовують водний розчин  $\text{CaCl}_2$  з масовою часткою 10%. Яке максимальне значення ізотонічного коефіцієнта  $\text{CaCl}_2$  у водному розчині?

- a) \*3
- b) 4
- c) 2

- d) 5
- e) 1

16. Які розчини можна використовувати як інфузійні?

- a) *\*ізотоничні*
- b) *гіпертоничні*
- c) *гіпотоничні*
- d) *колоїдні*
- e) *ідеальні*

17. Яким буде число ступенів свободи в системі салол - камфора, якщо з розплаву одночасно виділяються кристали обох компонентів?

- a) *\*0*
- b) *1*
- c) *2*
- d) *3*
- e) *1*

18. Співвідношення між масами рівноважних фаз в системі на діаграмі плавкості при даній температурі можна визначити за правилом:

- a) *\*важеля*
- b) *фаз Гіббса*
- c) *Дюкло - Траубе*
- d) *Шульце - Гарді*
- e) *Вант – Гоффа*

19. До якого виду систем можна віднести фізіологічний розчин NaCl:

- a) *\*гомогенна, двокомпонентна*
- b) *гетерогенна, двокомпонентна, трифазна*
- c) *гомогенна, трьохкомпонентна*

- d) *гомогенна, однокомпонентна*
- e) *гетерогенна, двофазна, трьохкомпонентна*

20. Гомогенною є:

- a) *\*система вода - етанол*
- b) *система масло-вода*
- c) *система вода-пісок*
- d) *система вода - хлорид натрію - глюкоза*
- e) *спресовані в таблетки порошки*

21. Вкажіть координати графіку кривих охолодження при термічному аналізі:

- a) *\*температура - час*
- b) *температура - склад*
- c) *температура - об`єм*
- d) *тиск - склад*
- e) *тиск - об`єм*

22. На діаграмі плавкості системи сечовина - саліцилова кислота три евтектичні точки. Скільки хімічних сполук утворюється при взаємодії цих речовин?

- a) *\*2*
- b) *1*
- c) *3*
- d) *4*
- e) *5*

23. Відносне зниження тиску насиченої пари розчинника (води) буде найбільшим над розчином NaCl:

- a) *\*гіпертонічним,  $C(\text{NaCl}) = 20\%$*

- b) гіпертонічним,  $C(\text{NaCl}) = 10\%$
- c) ізотонічним,  $C(\text{NaCl}) = 0,9\%$
- d) гіпотонічним,  $C(\text{NaCl}) = 0,1\%$
- e) гіпотонічним,  $C(\text{NaCl}) = 0,09\%$

24. Кріоскопічна стала дорівнює зниженню температури замерзання розчину, що містить 1 моль речовини в:

- a) \*1000г розчинника
- b) 1 літр розчинника
- c) 100г розчину
- d) 1 літр розчину
- e) 1000г розчину

25. При виробництві супозиторіїв використовують діаграми плавлення.

Правило фаз Гіббса для конденсованої системи записують так:

- a) \* $C = K - \Phi + 1$
- b)  $C = K - \Phi + 2$
- c)  $3 = \Phi - K + 1$
- d)  $3 = \Phi - K + 2$
- e)  $C = K - \Phi + n$

26. У евтектичній точці двокомпонентної системи з простою евтектикою в рівновазі знаходяться фази:

- a) \*2 твердих і розплав евтектичного складу
- b) 2 рідких і 1 тверда
- c) 3 твердих
- d) 1 тверда, 1 рідка і 1 газоподібна
- e) 1 рідка і 1 тверда

27. Чому дорівнює число ступенів свободи в точці перетину лінії ліквідусу з віссю ординат на діаграмі плавкості двокомпонентної системи з простою евтектикою:

- a) \*0
- b) 2
- c) 3
- d) 4
- e) 1

28. Тиск насиченої пари розчинника над розчином, до складу якого входить нелетка речовина, прямо пропорційний концентрації розчинника, що виражений:

- a) \*Мольною часткою
- b) Моляльністю
- c) Молярністю
- d) Массовою часткою
- e) Молярною масою еквівалента

29. Кріоскопічна і ебуліоскопічна сталі залежать від:

- a) \*Природи розчинника
- b) Концентрації розчину
- c) Температури
- d) Природи розчиненої речовини
- e) Наявності каталізатора

30. Йод, який використовується для медичних цілей очищують сублімацією. При цьому протікає процес:  $I_2$  (тв.)  $\rightarrow$   $I_2$  (г). Вкажіть число фаз, число компонентів і число ступенів свободи, що утворюється рівноважними системами, якщо  $n = 2$  (число зовнішніх параметрів):

- a) \* $\Phi = 2; K = 1; C = 1$

- b)  $\Phi = 3; K = 1; C = 0$
- c)  $\Phi = 1; K = 1; C = 2$
- d)  $\Phi = 2; K = 2, C = 2$
- e)  $\Phi = 3; K = 2, C = 1$

31. Для внутрішньовенних ін'єкцій використовують водневий розчин  $\text{CaCl}_2$  з масовою часткою 10 %. Яке максимальне значення ізотонічного коефіцієнту  $\text{CaCl}_2$  в водневому розчині?

- a) 1
- b) 5
- c) 4
- d) \*3
- e) 2

32. Чи ізотонічні при однаковій температурі 1% розчини глюкози і йодиду калію?

- a) \*ні
- b) так
- c) так, при 310 K
- d) так, при 298 K
- e) так, при 273 K

33. Ізотонічність - одна з вимог, що висуваються до ін'єкційних розчинів. Що відбувається з еритроцитами, зануреними в гіпотонічний розчин?

- a) \*набрякають і лопаються
- b) зморщуються
- c) змінюють колір
- d) набувають заряд
- e) змін немає

34. Чи залежить число ступенів свободи рівноважної гетерогенної системи від числа компонентів системи?

- a) *\*залежить в конденсованих системах*
- b) *не залежить*
- c) *залежить в рідких двокомпонентних системах*
- d) *залежить в біохімічних системах*

35. На діаграмі плавкості двокомпонентної системи з простою евтектикою вище лінії ліквідусу:

- a) *\*Обидва компоненти знаходяться в рідкому стані*
- b) *Обидва компоненти знаходяться в твердому стані*
- c) *Обидва компоненти знаходяться в газоподібному стані*
- d) *Кожен компонент знаходиться частково в різних агрегатних станах;*
- e) *Один з компонентів знаходиться в рідкому стані, другий - в твердому стані*

36. У потрійній точці на діаграмі стану води:

- a) *\* $C = 0$*
- b)  *$C = 2$*
- c)  *$\Phi = 3; C = 1$*
- d)  *$C = 1$*
- e)  *$\Phi = 3; C = 2$*

37. Розрахунок температури фазових перетворень при різних тисках має важливе практичне значення для сучасного фармацевтичного виробництва і здійснюється відповідно до:

- a) *\*Рівняння Клапейрона-Клаузіуса*
- b) *Правила Труттона*
- c) *Правила фаз Гіббса*

- d) *Рівняння Менделєєва-Клапейрона*
- e) *Законів Коновалова*

38. Вода в потрійній точці на діаграмі стану є системою:

- a) *\*інваріантною*
- b) *моноваріантною*
- c) *біваріантною*
- d) *трьохваріантною*
- e) *чотирьохваріантною*

39. Осмотичний тиск є важливою характеристикою біологічних рідин. Для проникнення молекул розчинника необхідна наявність напівпроникних мембран. Вкажіть, що з приведеного НЕ МОЖЕ використовуватися як напівпроникна мембрана:

- a) *\*Скло*
- b) *Колодієва плівка*
- c) *Желатин*
- d) *Біологічна мембрана*
- e) *Пергамент*

40. Термічний аналіз використовують у фармацевтичному виробництві та аналізі. Вкажіть кількість точок на діаграмі плавкості (ізоморфних речовин) NaBr-KBr, в яких система інваріантна.

- a) *\*2*
- b) *3*
- c) *4*
- d) *5*
- e) *1*

41. Для кількох 1% водних розчинів нелетких речовин визначили експериментально зниження температури кристалізації. Розчин речовини кристалізується при більш низькій температурі, якщо молярна маса речовин така:

- a) \*60
- b) 342
- c) 180
- d) 142
- e) 166

42. Розчини електролітів є лікарськими препаратами. Яке максимальне значення ізотонічного коефіцієнта для розчину  $MgSO_4$ ?

- a) \*2
- b) 4
- c) 3
- d) 5
- e) 7

43. Кріоскопічні постійні бензолу, оцтової кислоти, води, фенолу, камфори рівні відповідно 5,12; 3,9; 1,86; 7,39; 40,00. Який з розчинників слід вибрати для визначення молярної маси кріоскопічним методом?

- a) \*камфору
- b) оцтовою кислоту
- c) воду
- d) фенол
- e) Бензол

44. Лінія ліквідусу показує:

- a) \*залежність складу розплаву від температури
- b) склад рідкої фази при даній температурі

- c) *склад пари рівноважно киплячої рідини*
- d) *склад рівноважних рідких фаз*
- e) *склад твердої фази, що знаходиться в рівній фазі з розплавом*

45. Який осмотичний тиск повинні мати розчини, які використовуються в медицині, як ізотонічні розчини:

- a) *\*700 - 800 кПа*
- b) *200 - 300 кПа*
- c) *300 - 400 кПа*
- d) *500 - 600 кПа*
- e) *900 - 1000 кПа*

46. До колігативних властивостей не відноситься:

- a) *\*ступінь дисоціації*
- b) *осмотичний тиск*
- c) *Зниження тиску насиченої пари над розчином*
- d) *Пониження температури замерзання розчину*
- e) *Підвищення температури кипіння розчину*

47. При дослідженні розподілу йоду між хлороформом і водою було встановлено, що йод в кожній з рівноважних фаз знаходиться в такому ж молекулярному стані. Вкажіть, яким рівнянням слід скористатися для розрахунку коефіцієнта розподілу в цьому випадку:

- a) *\* $K = c^2 / c^1$*
- b)  *$lgK = lgc^2 - lgc^1$*
- c)  *$K = c^2 / cm^1$*
- d)  *$lgK = lgc^2 - mlgc^1$*
- e)  *$K = c^2 / c^1$*

48. Екстракція широко використовується у фармації для розділення сумішей. Цей процес ґрунтується на:

- a) \*Законі розподілу Нернста
- b) Законі Гесса
- c) Другому законі Дальтона
- d) Трьому законі термодинаміки
- e) Першому законі Коновалова

49. Суміш дрібних кристалів обох компонентів, що утворюється при охолодженні розплаву називається:

- a) \*евтектичною
- b) изоморфною
- c) емульсією
- d) суспензією
- e) пастою

50. Точка на діаграмі стану води, яка визначає рівновагу рідкої води, водяної пари і льоду називають:

- a) \*потрійною
- b) сингулярною
- c) евтектичною
- d) подвійною
- e) одинарною

51. Розчини мають велике значення в життєдіяльності організму. Ідеальні розчини підпорядковуються закону:

- a) \*Рауля
- b) Нернста
- c) Арреніуса
- d) Шарля

e) *Бойля-Маріот*

52. Вище лінії ліквідусу система знаходиться в стані:

- a) *\*У рідкому без кристалів компонентів*
- b) *У рідкому з кристалами евтектичного складу*
- c) *У рідкому з кристалами всіх компонентів*
- d) *У рідкому з кристалами двох компонентів*
- e) *У рідкому з кристалами одного компонента*

53. Кращим прикладом ідеального розчину, що підкоряється закону Рауля, є:

- a) *\*Гранично розбавлений розчин*
- b) *Розчин ацетону в хлороформі*
- c) *Бензол-етанол*
- d) *Бензол-вода*
- e) *Хлороформ-циклогексан*

54. Вкажіть, яку з наведених реакцій необхідно проводити при підвищеному тиску для збільшення виходу продукту, згідно з принципом Ле-Шательє:

- a) *\* $3H_2 (г) + N_2 (г) \rightarrow 2NH_3 (г)$*
- b)  *$Fe (т) + H_2O (г) \rightarrow FeO (т) + H_2 (г)$*
- c)  *$N_2O_4 (г) \rightarrow 2NO_2 (г)$*
- d)  *$CO (г) + H_2O (г) \rightarrow CO_2 (г) + H_2 (г)$*
- e)  *$H_2 (г) + Cl_2 (г) \rightarrow 2HCl (г)$*

55. Вкажіть, використовуючи принцип Ле-Шательє, проходження якого з перерахованих нижче процесів буде проходити при збільшенні тиску:

- a)  *$MgCO_3 (тв) \leftrightarrow MgO (тв) + CO_2$*
- b)  *$N_2 (г) + O_2 (г) = 2NO (г)$*

- c)  $*2NO (z) + O_2 (z) \rightarrow 2NO_2 (z)$
- d)  $CO (z) + H_2O (z) \leftrightarrow CO_2 (z) + H_2 (z)$
- e)  $Fe (m\vartheta) + H_2O (z) = FeO (m\vartheta) + H_2 (z)$

56. Який процес не відноситься до фазових перетворень?

- a) *\*полімеризація*
- b) *плавлення*
- c) *випаровування*
- d) *сублімація*
- e) *кристалізація*

57. Розчин речовини в вихідному розчиннику, що залишилася після видалення, де її концентрація менше, в порівнянні з екстрактом, називається:

- a) *\*рафінат*
- b) *елюент*
- c) *екстрагент*
- d) *діалізатах*
- e) *золь*

58. До якого типу систем відноситься фізрозчин:

- a) *\*гомогенна, однофазна, двокомпонентна*
- b) *гетерогенна, двокомпонентна, трьохфазна*
- c) *гомогенна, однофазна, трьохкомпонентна*
- d) *гомогенна, однофазна, однокомпонентна*
- e) *гетерогенна, двофазна, трьохкомпонентна*

59. До якого виду можна віднести дану систему, якщо в пробірці нагрівати вапняк:

- a) *\*гетерогенна, двофазна*
- b) *гомогенна, двофазна*

- c) *гомогенна, однофазна*
- d) *гетерогенна, трифазна*
- e) *гетерогенна, чотирьохфазна*

60. Ізотонічність - обов'язкова вимога, що пред'являється до інфузійних розчинів і очних крапель. Чи ізотонічні при однаковій температурі 1% розчини глюкози і йодиду калію?

- a) *\*ні*
- b) *так*
- c) *так, при 310 К*
- d) *так, при 298 К*
- e) *так, при 273 К*

61. Термічний аналіз широко застосовують у фармації. Вкажіть кількість точок на діаграмі плавкості салол-камфора, компоненти якої утворюють просту евтектику, у яких система інваріантна.

- a) *\*3*
- b) *2*
- c) *4*

62. Термічний аналіз - широко використовується у фармації. Вкажіть кількість точок на діаграмі плавкості фенол-п-толуїдин, компоненти якої утворюють одну хімічну сполуку, у яких число ступенів свободи дорівнює нулю.

- a) *\*5*
- b) *3*

63. Серед перелічених водних розчинів лікарських препаратів з однаковою молярністю максимальна температура кипіння відповідає розчину:

- a) \*Сульфату натрія
- b) Промедолу
- c) Нікотинаміду
- d) Резорцину
- e) Йода

64. Серед перелічених водневих розчинів лікарських препаратів з однаковою молярністю максимальна температура кипіння відповідає розчину:

- a) \*Натрій сульфат
- b) Нікотинамід
- c) Йод
- d) Резорцин
- e) Промедол

65. Лінію на діаграмі стану, вище якої не може існувати тверда фаза, називають.

- a) \*солідус
- b) евтетика
- c) медіана
- d) ліквідус
- e) конода

66. Були приготовлені водні розчини сахарози, KCl, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, AlCl<sub>3</sub> однаковою молекулярністю. Який з наведених нижче розчинів матиме найвищу температуру кипіння?

- a) \*розчин AlCl<sub>3</sub>
- b) розчин сахарози
- c) розчин KCl
- d) розчин фруктози

e) розчин  $Na_2SO_4$

67. При розрахунках кількостей допоміжних речовин, необхідних для ізотонування рідких лікарських форм, використовують значення ізотонічних коефіцієнтів Вант-Гоффа  $i$ . Вкажіть чому дорівнює коефіцієнт Вант-Гоффа для сульфату цинку, знаючи, що ця речовина повністю продисоціювала у водному розчині:

a)  $i = 1$

b)  $i = 0$

c)  $i = 4$

d)  $i = 3$

e)  $*i = 2$

68. Екстракція - це один з технологічних етапів виробництва лікарських препаратів. При дослідженні розподілу оцтової кислоти між хлороформом і водою було встановлено, що її молекули утворюють димери в органічному розчиннику. Вкажіть рівняння, яким слід скористатися для розрахунку коефіцієнта розподілу в цьому випадку:

a)  $*K = c_2/c_1$

b)  $lgK = lgc_2 - lgc_1$

c)  $K = c_2/c_1$

d)  $K = c_1/c_2$

69. Скільки фаз має система, що застосовується у технології фармацевтичного виробництва, як розрихлювач?  $NH_4HCO_3(T) > NH_3(G) + CO_2(G) + H_2O(P)$

a)  $*3$

b) 4

c) 5

d) 2

70. Більшість технологічних процесів у фармації відбуваються в різнофазових системах. Яка кількість фаз міститься в евтектиці двохкомпонентної системи?

- a) \*3
- b) 2
- c) 5
- d) 4

71. Ступінь виділення лікарської речовини в процесі екстракції залежить від величини коефіцієнта розподілу. Якщо речовина, розподіляється, характеризується різними ступенями дисоціації або асоціацією в різних фазах, коефіцієнт розподілу розраховують за:

- a) *Законом розподілу Нернста*
- b) *Правилом фаз Гіббса*
- c) *\*Рівнянням Шилова*
- d) *Першим законом Рауля*

72. Величина тиску насиченої пари ідеальних розчинів, утворених леткими компонентами, у розчині певного складу:

- a) *\*Має проміжне значення між величинами тисків пари чистих компонентів*
- b) *Має максимальне значення*
- c) *Має мінімальне значення*
- d) *Має значення тиску пари одного з чистих компонентів*
- e) *Дорівнює сумі тисків насиченої пари чистих компонентів*

73. До зміни значення константи рівноваги хімічної реакції призведе:

- a) *зміна тиску газоподібних реагентів*
- b) *від продуктів реакції*
- c) *зміна концентрації реагуючих речовин*

- d) *введення каталізатора*
- e) *\*зміна температури*

74. Більшість технологічних процесів у фармації відбувається в різнофазових системах. Які фази знаходяться в рівновазі в евтектичній точці двокомпонентної системи з простою евтектикою?

- a) *1 рідка і 1 тверда*
- b) *2 тверді*
- c) *3 тверді*
- d) *2 рідких і 1 тверда*
- e) *\*1 рідка і 2 тверді*

75. При однаковій температурі дано 5 водних розчинів з молярною концентрацією 0,05 моль/кг. Які з цих розчинів є ізотонічними по відношенню один до одного?

- a)  *$AlCl_3$  і  $CaCl_2$*
- b)  *$CH_3OH$  і  $NaCl$*
- c)  *$AlCl_3$  і  $CaCl_2$*
- d)  *$C_6H_{12}O_6$  і  $NaCl$*
- e) *\* $NaCl$  і  $MgSO_4$*

76. У рівнянні закону Рауля концентрація має вираз:

- a) *Нормальна частка*
- b) *Молярна частка*
- c) *Молекулярна частка*
- d) *Масова частка*
- e) *\*Мольна частка*

77. Фазові діаграми використовують у фармацевтичному аналізі. Як називається лінія на діаграмі стану евтектичного типу, нижче якої не може існувати рідка фаза?

- a) \*Солідус
- b) Ліквідус
- c) Коноді
- d) Нода

78. Яке правило використовують для характеристики гетерогенних систем, у яких встановлюється фазова рівновага?

- a) \*Правило фаз Гіббса
- b) Петерса
- c) Вант-Гоффа
- d) Штаудінгера
- e) Нернста

79. Для очищення гнійних ран в хірургії зовні використовують 5% розчин NaCl, він називається:

- a) \*гіпертонічний
- b) ізотонічний
- c) фізіологічний
- d) ненасичений
- e) гіпотонічний

80. Кріоскопічна постійна розраховується для окремих розчинників як зниження температури замерзання:

- a) розчину з мольної часткою, що дорівнює 1
- b) \*одномолярного розчину
- c) одинормальним розчину
- d) одновідсоткового розчину

e) *одномолярного розчину*

81. Для визначення кількісного складу розчину по закону Рауля використовували явище зниження тиску насиченої пари над розчином. Яку концентрацію визначали?

- a) *молярна концентрація*
- b) *\*молярна частка*
- c) *молярна концентрація*
- d) *титр*
- e) *відсоткова концентрація*

82. Колігативні властивості визначаються:

- a) *Температурою*
- b) *Природою розчинника*
- c) *\*Числом частинок в розчині*
- d) *Природою розчиненої речовини*
- e) *Коефіцієнтом дифузії*

83. При внутрішньовенному введенні деякого розчину відбулося явище зморщування еритроцитів (плазмоліз). Який розчин вводили?

- a) *\*гіпертонічний*
- b) *гіпотонічний*
- c) *ізотонічний*
- d) *фізіологічний*
- e) *колоїдний*

84. Закону Рауля підкоряються тільки:

- a) *реальні розчини*
- b) *колоїдні розчини*
- c) *гомогенні розчини*

- d) \*ідеальні розчини
- e) гетерогенні розчини

85. Значення ізотонічної концентрації для розчину глюкози (%) дорівнює:

- a) \*5
- b) 1
- c) 0,5
- d) 0,9
- e) 10

86. Вкажіть систему, яка є прикладом необмеженої розчинності рідин:

- a) \*Вода - етанол
- b) Толуол - NaCl
- c) Вода - ртуть
- d) Вода - бензол
- e) Фенол - вода

87. Уявні ступені дисоціації нижче наведених електролітів у 0,01 М водному розчині однакові. Вкажіть речовину, розчин якої має найвищу температуру кипіння (найбільший осмотичний тиск):

- a) \* $Al_2(SO_4)_3$
- b) KCl
- c)  $Na_3PO_4$
- d)  $Cu(NO_3)_2$
- e)  $K_3PO_4$

88. У лабораторній та заводській практиці виділяють та очищують ефірні олії, алкалоїди, антибіотики та інші лікарські речовини за допомогою селективних розчинників. Цей процес називається:

- a) *\*Екстракція*
- b) *Седиментація*
- c) *Коагуляція*
- d) *Флокуляція*
- e) *Флотація*

89. Яким має бути тиск парів рідини при кипінні?

- f) *\*рівним атмосферному*
- g) *максимальним*
- h) *рівним тиску насиченої пари при 273 K*
- i) *мінімальним*
- j) *рівним тиску насиченої пари при кімнатній температурі*

90. Під час яких фазових перетворень має місце збільшення ентропії?

- a) *Кристалізація і конденсація*
- b) *Сублімація і кристалізація*
- c) *Плавлення і кристалізація*
- d) *Кипіння і конденсація*
- e) *\*Плавлення і випаровування*

91. Фармакопейний ебуліоскопічний метод кількісного визначення спирту у складі водно-спиртової суміші заснований на експериментальному визначенні це:

- a) *Осмотичного тиску*
- b) *\*Температур кипіння*
- c) *Температур розчинення*
- d) *Опору*
- e) *Температур кристалізації*

92. Обчислення температури фазових перетворень при різних тисках має важливе практичне значення для сучасного фармацевтичного виробництва і здійснюється відповідно до:

- a) *\*Рівняння Клапейрона-Клаузіуса*
- b) *Правила Труттона*
- c) *Правила фаз Гіббса*
- d) *Рівняння Менделєєва-Клапейрона*
- e) *Законів Коновалова*

93. У фармацевтичній промисловості для очищення і виділення ряду органічних речовин з високою температурою кипіння і нерозчинних у воді речовин, можна застосувати:

- a) *\*перегонку з водяною парою*
- b) *фракційну перегонку*
- c) *ректифікацію*
- d) *послідовну ректифікацію*
- e) *термічний аналіз*

94. Визначення температури кипіння водно - спиртових сумішей є фармакопейним методом кількісного визначення спирту. Який метод дозволяє визначити зміну температури кипіння?

- a) *\*Ебуліоскопія*
- b) *Кріоскопія*
- c) *Ентероскопія*
- d) *Осмометрія*
- e) *Кондуктометрія*

95. Фізіологічний розчин 0,9% NaCl по відношенню до сироватки крові є:

- a) *\*Ізотонічним*

- b) -
- c) *Гіпертонічний*
- d) *Ізотонічним*
- e) *Гіпотонічним*

96. <sup>2023</sup> Визначте, який параметр враховує відхилення властивостей реального розчину від ідеального:

- a) *\*активність*
- b) *ізотонічний коефіцієнт*
- c) *концентрація*
- d) *фугітивність*
- e) *ступінь дисоціації*

97. Під час аналізу лікарських субстанцій часто застосовують екстракцію. Від чого залежить ступінь вилучення таким методом речовини, що визначається:

- a) *\*коефіцієнта розподілу*
- b) *pH розчину*
- c) *температури*
- d) *кількості речовини, що вилучається*
- e) *маси речовини, що вилучається*

98. Для характеристики яких розчинів використовують ізотонічний коефіцієнт?

- a) *\*електролітів*
- b) *неелектролітів*
- c) *високомолекулярних речовин*
- d) *колоїдних ПАР*
- e) *розчинів високомолекулярних сполук*

99. У стоматологічній практиці використовують рідкі лікарські форми, які у своєму складі мають камфору та хлоралгідрат. Які фази перебувають у рівновазі в евтектичній точці діаграми плавкості суміші камфора-хлоралгідрат?

- a) *Евтектичний розплав, кристали камфори*
- b) *Евтектичний розплав, кристали хлоралгідрату*
- c) *Кристали камфори, кристали хлоралгідрату*
- d) *Евтектичний розплав*
- e) *\*Евтектичний розплав, кристали камфори, кристали хлоралгідрату*

100. У фармації для вилучення БАР із рослинної сировини застосовують екстракцію. Який закон лежить в основі цього процесу?

- a) *Діючих мас*
- b) *Оствальда*
- c) *Коновалова*
- d) *\*Розподілу*
- e) *Пуазейля*

## ТЕОРЕТИЧНИЙ МАТЕРІАЛ ЗА ТЕМОЮ ЗАНЯТТЯ

### ФАЗОВІ ПЕРЕХОДИ ПЕРШОГО ТА ДРУГОГО РОДІВ

Як відомо, залежно від зовнішніх термодинамічних умов (температури, тиску, складу системи) одна й та сама речовина може перебувати в різних фазових станах, які відповідають певним агрегатним станам речовини або структурним формам. При зміні цих умов речовина здатна переходити з однієї фази в іншу, що супроводжується перебудовою її внутрішньої структури та зміною фізико-хімічних властивостей.

Такий перехід називається фазовим переходом або фазовим перетворенням. Фазові переходи є фундаментальним об'єктом вивчення фізичної хімії та термодинаміки, оскільки вони визначають умови існування фаз, стабільність речовин і можливість керування їх властивостями в технологічних процесах.

#### *Класифікація фазових переходів*

Залежно від характеру змін термодинамічних функцій фазові переходи поділяють на фазові переходи *першого та другого роду*.

#### *Фазові переходи першого роду*

Фазовим переходом першого роду називають такий фазовий перехід, при якому:

- енергії Гіббса фаз, що співіснують у рівновазі, є однаковими;
- спостерігається стрибкоподібна зміна ентропії та об'єму системи під час переходу з однієї фази в іншу.

Характерною особливістю фазових переходів першого роду є те, що вони супроводжуються поглинанням або виділенням теплоти, яка отримала назву *прихованої теплоти фазового перетворення*  $\Delta H_f$ . При цьому температура системи залишається сталою, незважаючи на підведення або відведення теплоти, доки фазовий перехід не завершиться повністю.

До типових прикладів фазових переходів першого роду належать:

- випаровування та конденсація;
- плавлення та кристалізація;
- сублімація та десублімація;
- твердофазні переходи між різними кристалічними модифікаціями речовин, зокрема: перехід сірого олова в біле, графіту в алмаз, моноклінної сірки в ромбічну тощо.

Зазначені процеси мають важливе практичне значення у фармацевтичній технології, матеріалознавстві та створенні стабільних лікарських форм, оскільки фазовий стан речовини безпосередньо впливає на її розчинність, біодоступність і стабільність.

#### *Фазові переходи другого роду*

Поряд із фазовими переходами першого роду існують також фазові переходи другого роду. Для них характерно:

- однаковість енергій Гіббса, ентропій та об'ємів фаз, що перебувають у рівновазі;
- відсутність теплового ефекту фазового перетворення;
- відсутність стрибкоподібної зміни об'єму при температурі переходу.

Однак у точці фазового переходу другого роду спостерігаються стрибки похідних термодинамічних величин, зокрема: теплоємності  $C = T(dT dS)P$ , коефіцієнта термічного розширення  $\beta = 1/V(dV/dT)P$ .

Таким чином, фазові переходи другого роду не супроводжуються прихованою теплотою, але призводять до істотних змін фізичних властивостей речовини.

Прикладами фазових переходів другого роду є:

- перехід речовини у надпровідниковий стан;
- перехід парамагнетика у феромагнетик;
- перехід рідкого гелію у надтекучий стан.

#### *Практичне значення фазових переходів*

Найбільший практичний інтерес у хімічній технології, фармації та матеріалознавстві становлять фазові переходи першого роду, оскільки саме вони лежать в основі процесів плавлення, кристалізації, випаровування та стабілізації фазового стану речовин.

У зв'язку з цим у подальшому матеріалі детальніше розглянемо фазові переходи першого роду, їх термодинамічні характеристики та роль у формуванні фазових діаграм.

### РІВНЯННЯ КЛАПЕЙРОНА-КЛАУЗІУСА

Рівняння Клапейрона-Клаузіуса відображає особливості фазових переходів першого роду. Виведемо це рівняння, розглядаючи систему, в якій при постійних тиску й температурі в рівновазі перебувають рідина та її пара. Якщо випарити рівноважним чином визначену кількість (наприклад 1 моль) рідини, то змінення внутрішньої енергії буде дорівнювати:

$$\Delta U = T\Delta S - P\Delta V$$

або

$$U_n - U_p = T(S_n - S_p) - P(V_n - V_p)$$

Звідси:

$$U_n + PV_n - TS_n = U_p + PV_p - TS_p$$

і

$$G_n = G_p$$

Якщо змінити температуру й тиск системи, то мольні енергії Гіббса теж зміняться й будуть дорівнювати:

$$G_n + dG_n = G_p + dG_p$$

Змінення  $P$  і  $T$  проведемо так, щоб система в новому стані знову перебувала у рівновазі. Тоді:

$$G_n + dG_n = G_p + dG_p$$

$$dG_n = dG_p$$

Тобто, щоб не змінилася при змінненні температури й тиску рівновага, змінювання мольної енергії Гіббса (хімічного потенціалу) пари повинно дорівнювати її змінненню для рідини.

Використовуючи вираз для диференціала енергії Гіббса, отримуємо:

$$-S_{\text{п}}dT + V_{\text{п}}dP = -S_{\text{р}}dT + V_{\text{р}}dP,$$

або

$$(V_{\text{п}} - V_{\text{р}})dP = (S_{\text{п}} - S_{\text{р}})dT$$

Ураховуючи, що випарювання проводиться при постійній температурі, приріст ентропії при переході рідини в пару можна виразити через приховану теплоту випарювання ( $\Delta H_{\text{в}}$ ):

$$S_{\text{і}} - S_{\text{р}} = \frac{\Delta H_{\text{в}}}{T}$$

Беручи до уваги отримане співвідношення, отримуємо:

$$\Delta H_{\text{в}} = T(V_{\text{п}} - V_{\text{р}}) \frac{dP}{dT}$$

Це рівняння Клапейрона-Клаузіуса у диференціальному вигляді. Його можна записати і для інших фазових переходів. Так, для возгонки (сублімації):

$$\Delta H_{\text{с}} = T(V_{\text{п}} - V_{\text{т}}) \frac{dP}{dT} \text{ - для плавлення;}$$

$$\Delta H_{\text{пл}} = T(V_{\text{р}} - V_{\text{т}}) \frac{dP}{dT} \text{ - у загальному випадку будь-якого фазового}$$

переходу;

$$\Delta H_{\text{ф}} = T(V_2 - V_1) \frac{dP}{dT}$$

Рівняння Клапейрона-Клаузіуса подає залежність тиску пари над рідиною або твердим тілом (рівновага рідина-пара або тверде тіло-пара) від температури або залежність температури плавлення (рівновага тверде тіло-рідина) від тиску. Ці залежності, як правило, подають у вигляді діаграм стану. У наступних розділах при розгляді діаграм стану будемо використовувати виведені співвідношення.

Для фазових переходів за участю пари (випарювання, сублімація, конденсація) отримане рівняння Клапейрона-Клаузіуса можна перетворити у більш зручне для практичного використання. Для цього необхідно зробити такі припущення:

1 Пар вважати ідеальним газом, для одного моля якого  $PV=RT$ .

2 Знехтувати мольним об'ємом рідкої або твердої речовини порівняно до мольного об'єму пари.

3 Знехтувати залежністю теплоти фазового переходу від температури (це справедливо для невеликих інтервалів температур).

Тоді для процесу випарювання, наприклад, можна записати:

$$\Delta H_B = T \cdot V_n \frac{dP}{dT}$$

Але  $V_n = RT/P$  і звідси:

$$\Delta H_B = \frac{RT^2}{P} \cdot \frac{dP}{dT},$$

або

$$\frac{d \ln P}{dT} = \frac{\Delta H_B}{RT^2}.$$

Інтегруючи цей вираз у межах від  $P_1$  до  $P_2$  і відповідно від  $T_1$  до  $T_2$ , отримуємо:

$$\ln \frac{P_1}{P_2} = \frac{\Delta H_B}{R} \cdot \frac{T_2 - T_1}{T_2 \cdot T_1}$$

При інтегруванні співвідношення у вузькому довільному інтервалі температур отримуємо:

$$\ln P = -\frac{\Delta H_B}{RT} + B$$

Тут  $B$  – стала інтегрування. Для процесу сублімації:

$$\ln P = -\frac{\Delta H_C}{RT} + B'.$$

Рівняння показують, що логарифм тиску пари над твердою й рідкою речовинами лінійно залежить від зворотної температури. Нахил цих прямих залежить від величини теплоти фазового переходу. Оскільки  $\Delta H_C > \Delta H_B$ ,

пряма для твердої речовини є більш крутою, ніж пряма для рідини. Точка перетину цих прямих відповідає температурі плавлення речовини.

Виведені нами залежності  $\ln P = f(1/T)$  мають велике практичне значення. За допомогою таких рівнянь розраховують значення тиску насиченої пари над рідкою та твердою речовинами при різних температурах. Справа у тому, що в довідниках із фізичної хімії є багато даних щодо тисків насичених парів у вигляді коефіцієнтів рівняння:

$$\lg P = - A/T + B$$

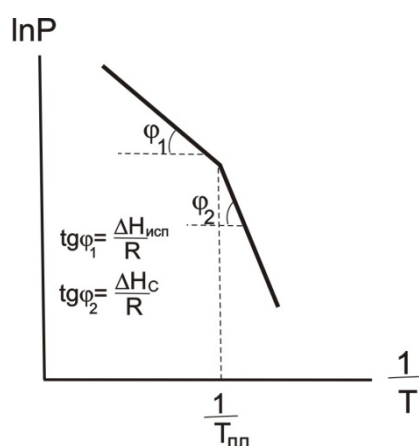


Рис. 1 Залежність логарифма тиску насиченої пари ( $\ln P$ ) від оберненої температури ( $1/T$ ) для різних фаз речовини; визначення теплот фазових переходів за кутами нахилу прямих ( $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ ) (Картель М. Т., Тананайко Ю. М., Ульберг З. Р. Фізична та колоїдна хімія : навчальний посібник для фармацевтичних спеціальностей. Київ : Академперіодика, 2014. 456 с.)

Тут  $A = \frac{\Delta H}{2,303R}$ , а  $P$  – тиск насиченої пари, що поданий у мм.рт.ст. При

цьому зазначається температурний інтервал, у якому виконується ця залежність. І якщо необхідно знати тиск насиченої пари над будь-якою речовиною, зовсім необов'язково виміряти цей тиск експериментально, а достатньо знайти коефіцієнти  $A$  і  $B$  у довіднику. Наприклад, тиск насиченої пари над твердим  $ZnCl_2$  відшуковують за допомогою рівняння:

$$\lg P = -\frac{5370}{T} + 11,709 \quad (503-673 \text{ K}).$$

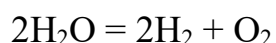
Звідки:

$$\Delta H_C (\text{ZnCl}_4) = 102,7 \text{ кДж/моль}$$

## ТЕРМОДИНАМІЧНІ УМОВИ ФАЗОВОЇ РІВНОВАГИ. ПРАВИЛО ФАЗ

Згадаємо деякі, вже відомі нам, визначення. Система, що складається із декількох фаз, називається *гетерогенною*. А *фазою* в термодинаміці називається гомогенна частина гетерогенної системи, що має однаковий склад, фізичні та хімічні властивості, відділена від інших частин системи поверхнею поділу, при переході через яку відбувається стрибкоподібне змінення системи.

*Компонентом системи* називають будь-яку речовину, що входить до складу системи, і при видаленні з неї може існувати у вільному вигляді. Спеціально виділяють поняття *незалежного компонента*. Справа у тому, що у системі можуть проходити хімічні реакції, і речовини системи не будуть незалежними. Кількість незалежних компонентів дорівнює кількості компонентів мінус кількість хімічних реакцій, що їх зв'язують. Наприклад, чиста вода за нормальних умов – однокомпонентна система. При температурах порядку 1000<sup>0</sup>С відбувається дисоціація води за рівнянням:



Тут уже три речовини, але між ними проходить одна хімічна реакція. Отже, система двокомпонентна.

При описуванні багатокомпонентних систем завжди необхідно знати їх склад. Існує багато способів вираження складу цих систем. Найбільш зручним є вираження кількості компонентів у мольних частках.

*Мольною часткою* компонента системи називають відношення кількості молів цього компонента до загальної кількості молів системи.



чином, хімічні потенціали  $K$  компонентів у  $\Phi$  фазах можна виразити за допомогою  $\Phi(K-1)$  змінних. Загальна кількість змінних у рівностях дорівнює:

$$2\Phi + \Phi \cdot (K-1)$$

Кожен рядок рівності дає  $(\Phi-1)$  рівнянь. Кількість усіх рядків дорівнює  $(K+2)$ . Отже, кількість незалежних рівнянь дорівнює  $(\Phi-1) \cdot (K-2)$ . Кількість рівнянь не може перевищувати кількості змінних, інакше рівняння будуть наслідками одне одного або несумісними. Отже, можна записати:

$$2\Phi + \Phi \cdot (K-1) \geq (\Phi-1) \cdot (K+2)$$

Звідки:

$$\Phi \leq K + 2.$$

Це одна з форм запису правила фаз: *кількість фаз, що перебувають у стані рівноваги, менша або дорівнює кількості компонентів плюс два.*

Ми вивели правило фаз зі співвідношення кількості змінних та кількості рівнянь. Якщо кількість змінних дорівнює кількості рівнянь, то можна знайти значення усіх змінних, і всі вони будуть мати однозначне, визначене значення. Якщо кількість рівнянь менша від кількості змінних, то не можна знайти значення усіх змінних, маємо тільки зв'язок між ними. Наприклад, якщо взяти одне рівняння з двома невідомими  $x + y = a$ , то не можна знайти значення  $x$  і  $y$  окремо.

Рівняння передає тільки зв'язок між  $x$  і  $y$ . Довільно можна міняти одну змінну, а інша буде набувати цілком визначених значень, що визначаються рівняннями. Іншими словами, існує один ступінь свободи. Якщо було б три змінних і одне рівняння, то можна б змінювати довільно дві змінні, тобто мати два ступені свободи тощо.

У загальному випадку кількість ступенів свободи дорівнює різниці між кількістю змінних та кількістю рівнянь, що їх зв'язують. Іншими словами, кількість ступенів свободи – це кількість змінних, які можна змінювати довільно. Значення інших змінних визначатимуться з рівнянь. Знайдемо

відповідно до цього кількість ступенів свободи  $C$  як різницю між кількістю змінних рівнянь:

$$C = 2\Phi + (K - 1) \cdot \Phi - (\Phi - 1) \cdot (K + 2),$$

або

$$C = K - \Phi + 2.$$

*Кількість ступенів свободи рівноважної термодинамічної системи, на яку із зовнішніх чинників впливають тільки температура й тиск, дорівнює кількості незалежних компонентів мінус кількість фаз плюс два.*

Це – ще одне формулювання правила фаз, що найчастіше використовується.

У окремому випадку, коли розглядають систему при постійному тиску або температурі, правило фаз набуває вигляду:

$$C = K - \Phi + 1$$

Якщо на рівновагу в системі, крім температури й тиску, можуть впливати інші зовнішні чинники, наприклад, електричні та магнітні поля, поле тяжіння на ін., то кількість зовнішніх чинників  $n$  буде більше двох і:

$$C = K - \Phi + n$$

Кількість ступенів свободи характеризує варіантність системи, тобто кількість незалежних змінних (тиск, температура й концентрація компонентів), які можна змінювати в деяких межах так, щоб кількість і вигляд фаз залишилися без змін.

При класифікації систем їх прийнято розділяти за кількістю фаз на однофазові, двофазові тощо, за кількістю компонентів – на однокомпонентні, двокомпонентні, трикомпонентні тощо, за кількістю ступенів свободи – на інваріантні ( $C=0$ ), моноваріантні ( $C=1$ ), біваріантні ( $C=2$ ) тощо.

У реальних термодинамічних системах фазові переходи не завжди відбуваються миттєво при досягненні умов фазової рівноваги. Досить часто система може перебувати у так званому метастабільному стані, коли фаза зберігається за межами області термодинамічної стабільності. Типовими прикладами таких станів є переохоложені рідини та пересичені розчини.

Існування метастабільних станів має важливе практичне значення, оскільки саме вони визначають особливості процесів кристалізації, формування поліморфних модифікацій речовин та стабілізації аморфних форм, що широко використовується у фармацевтичній технології.

Перебіг фазових переходів визначається не лише термодинамічними умовами, а й кінетичними чинниками, зокрема швидкістю зародження нової фази та росту кристалів. Навіть за наявності термодинамічної можливості фазового переходу його реалізація може бути сповільненою через існування енергетичних бар'єрів. Тому при практичній реалізації технологічних процесів важливу роль відіграють режими охолодження, нагрівання, перемішування та наявність центрів кристалізації, які істотно впливають на кінетику фазових перетворень.

У сучасному трактуванні фазові переходи другого роду розглядають як неперервні фазові переходи, для яких характерна відсутність прихованої теплоти та безперервна зміна параметра порядку. У таких системах поблизу температури фазового переходу спостерігається різка зміна похідних термодинамічних величин, що зумовлює аномальну поведінку теплоємності, коефіцієнта термічного розширення та інших фізичних властивостей. Це свідчить про складну природу фазових переходів другого роду, які виходять за межі класичного опису і потребують урахування флуктуаційних явищ.

Знання закономірностей фазових переходів має фундаментальне і прикладне значення. Вибір фазового стану речовини, контроль її структурних форм та стабільності є ключовими чинниками при розробленні лікарських засобів і парфумерно-косметичних продуктів. Фазові переходи першого роду лежать в основі процесів плавлення, кристалізації, випаровування та сублімації, які широко застосовуються в технологічній практиці, тоді як фазові переходи другого роду визначають фізичні властивості матеріалів у вузьких температурних інтервалах.

Таким чином, розуміння природи фазових переходів, їх термодинамічних і кінетичних особливостей є необхідною умовою для

аналізу фазових рівноваг та побудови фазових діаграм. Отримані теоретичні уявлення створюють основу для подальшого вивчення термодинамічних умов фазової рівноваги, правила фаз Гіббса та практичного аналізу фазових діаграм у хімічній, фармацевтичній і косметичній технологіях.

## **ФАЗОВА РІВНОВАГА В ОДНО- ТА ДВОКОМПОНЕНТНИХ СИСТЕМАХ**

*Фазова рівновага в однокомпонентних системах. діаграма стану води*

Однокомпонентна система складається з індивідуальної речовини, що може існувати в різних агрегатних станах (твердому, рідкому, пароподібному) і в різних твердих станах – поліморфних модифікаціях (сірка ромбічна й моноклінна, олово біле та сіре тощо).

Стан однокомпонентних систем визначають дві незалежні змінні, як правило, температура й тиск. Усі інші змінні є функціями цих двох. Таким чином, діаграма стану однокомпонентної системи зображується на площині.

Як приклад діаграм стану однокомпонентних систем розглянемо діаграму стану води. Важливість знання властивостей цієї системи визначається хоча б тим, що вода є самим найпоширенішим розчинником і більшість промислових процесів проходить у водних розчинах.

Згідно з правилом фаз максимальна кількість фаз, що перебувають у рівновазі, для однокомпонентної системи дорівнює 3. У цьому випадку система інваріантна й на діаграмі повинна зображатися точкою (потрійна точка 0 на рис. 2). У точці 0 існують три фази: лід – рідка вода – водяна пара. Така система може існувати лише при визначених температурі й тиску ( $P = 4,579 \text{ мм рт. ст.} = 609 \text{ Па}$ ,  $T = 0,01^{\circ} = 273,16 \text{ К}$ ). Якщо змінити в цій точці одну зі змінних, то зникне одна з фаз. Наприклад, якщо збільшити температуру, то зникне тверда фаза. Слід відзначити, що поки фаза не зникне, температура не зміниться.

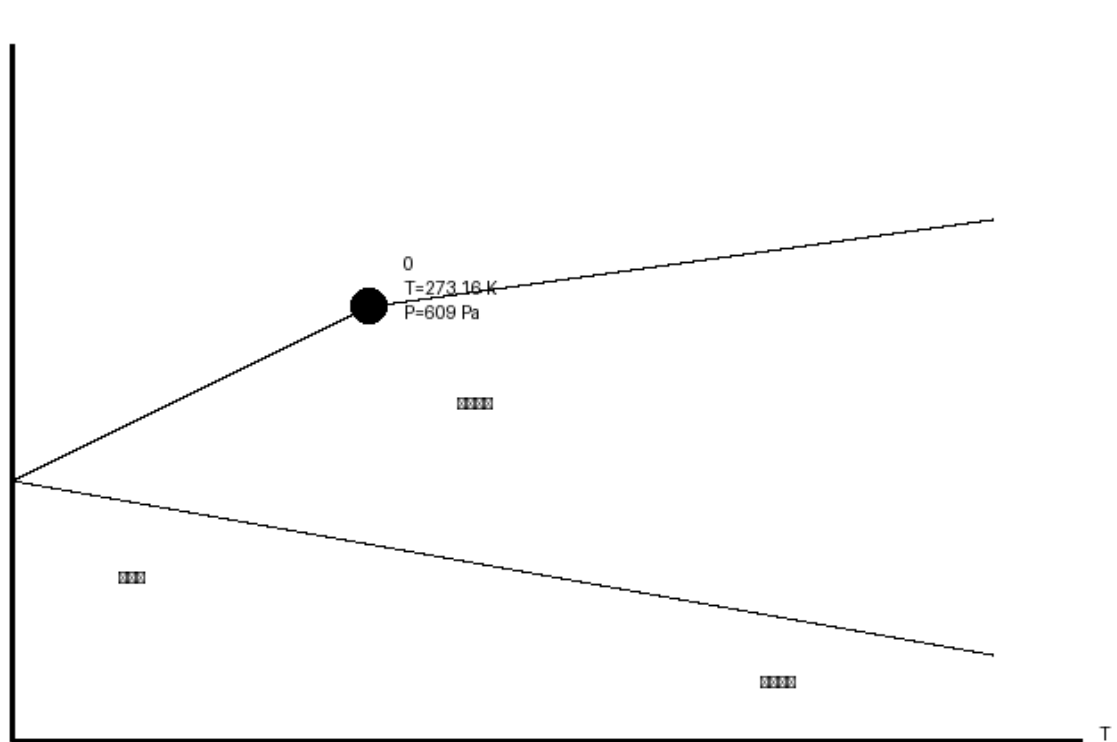


Рис. 2 Фазова діаграма стану води (однокомпонентна система). Потрійна точка  $O$  відповідає умовам одночасного існування трьох фаз: льоду, рідкої води та водяної пари ( $T = 273,16 \text{ K}$ ,  $P = 609 \text{ Pa}$ ). У потрійній точці система є інваріантною; зміна температури або тиску призводить до зникнення однієї з фаз та переходу системи в двофазну область (Картель М. Т., Тананайко Ю. М., Ульберг З. Р. Фізична та колоїдна хімія : навчальний посібник для фармацевтичних спеціальностей. Київ : Академперіодика, 2014. 456 с.)

Після зникнення твердої фази залишиться двофазна система «рідина – пара». Вона інваріантна, отже, зображується лінією. Лінія ОК відображає рівновагу рідина – пара. У цій системі можна змінювати або тиск, або температуру, і все одно система буде залишатися двофазною. Якщо підвищувати температуру, то тиск буде автоматично збільшуватися, так що фігуративна точка  $m$  буде рухатися вгору по кривій ОК.

*Фігуративна точка* – це будь-яка точка на діаграмі, що характеризує параметри в цілому.

При подальшому підвищенні температури лінія ОК скінчиться в точці К – критичній точці, вище якої рідина не може існувати. Оскільки система зображується точкою, вона інваріантна. Отже, в критичній точці у рівновазі перебувають три фази: рідина, пара та позакритична фаза (іноді говорять – газ).

Якщо в потрійній точці відводити від системи тепло, то зникне рідина. Система набуде двофазного стану: «лід – пара». Вона моноваріантна (крива ОВ). Нахил кривих ОК і ОВ може бути знайдений із рівняння Клапейрона-Клаузіуса, що описує залежність тиску пари від температури. Для рівноваги «рідина-пара» та «тверде тіло-пара» можна використовувати приблизну форму цього рівняння:

$$\frac{d \ln P}{dT} = \frac{\Delta H_B}{RT^2} \quad \text{і} \quad \frac{d \ln P}{dT} = \frac{\Delta H_C}{RT^2}$$

Оскільки теплота сублімації більша від теплоти випарювання, крива ОВ проходить більш круто, ніж крива ОК.

Якщо в потрійній точці спробувати збільшити тиск (наприклад, зменшуючи об'єм системи), то це призведе до конденсації пари. Поки не зникне вся пара, тиск буде постійним.

Крива СО описує двофазну моноваріантну систему «тверде тіло – рідина». Це, по суті, крива залежності температури плавлення води від зовнішнього тиску. Її нахил також визначається рівнянням Клапейрона-Клаузіуса, але тепер треба брати точну його форму, оскільки молярні об'єми рідини і твердого тіла близькі один до одного:

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\Delta H_{пл}}{T(V_p - V_n)}$$

Таким чином, нахил кривої ОС буде визначатися різницею  $V_p - V_n$ . Для води молярний об'єм твердої фази більший за молярний об'єм рідкої фази, тому похідна менша нуля, а крива ОС нахилена вліво. Це аномалія (те саме спостерігається у чавуну і вісмуту), у більшості речовин  $V_p - V_n < 0$ , і відповідна крива нахилена вправо.

Якщо взяти будь-яку двофазну моноваріантну систему, наприклад рідина-пара (точка  $m$ ), і при постійній температурі змінювати тиск, то зникне ще одна фаза: при підвищенні тиску – пара, при зниженні – рідина.

Таким чином, приходимо до однофазної системи з двома ступенями вільності. Система диваріантна. Вона зображується областями площини, що лежать між кривими. Область ВОК – область пари, СОК – рідини, ВОС – твердої фази.

Нами розглянута неповна діаграма стану води. Насправді при значному підвищенні тиску у воді з'являються нові кристалічні модифікації і, як наслідок, нові потрійні точки (всього у льоду на сьогодні розрізняють шість кристалічних модифікацій).

Як приклад однокомпонентної системи, у якій існують декілька кристалічних модифікацій, розглянемо сірку.

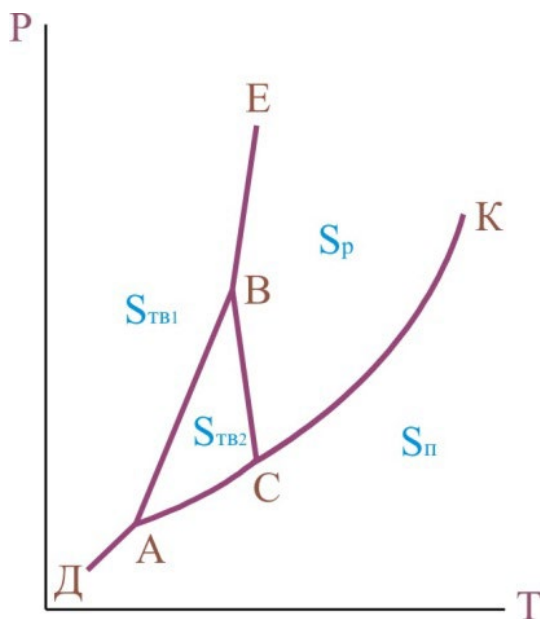


Рис. 3 Діаграма фазової рівноваги однокомпонентної системи у координатах тиск (P) – температура (T), АВ – лінія насиченої пари ( $S_{TB_1}$ ), ВС – лінія кристалізації ( $S_{TB_2}$ ), ЕК – крива випаровування/конденсації ( $S_p$ ),  $S_p$  – область стабільності пари,  $S_л$  – область стабільності рідини,  $S_{TB_1}$ ,  $S_{TB_2}$  – області стабільності твердих фаз, Д – початкова точка, К – критична точка (Гордієнко В. П., Глуценко Л. М. Фізична хімія. Фазові рівноваги : навчальний посібник. Харків : НФаУ, 2012. 312 с.)

Діаграма стану наведена на рис. 3. Сірка може перебувати в чотирьох фазах: пароподібній  $S_{п}$ , рідкій  $S_{р}$  і двох кристалічних (ромбічна сірка  $S_{ТВ1}$  і моноклінна сірка  $S_{ТВ2}$ ). Лінії на діаграмі характеризують: СК – моноваріантну, двофазну систему «рідина-пара»; АС – рівновагу «сірка моноклінна – пара»; ДА – рівновагу сірка ромбічна – пара; ВС – рівновагу «рідина – сірка моноклінна» (залежність температури плавлення моноклінної сірки від тиску); ВЕ – рівновагу «рідина – сірка ромбічна» (залежність температури плавлення ромбічної сірки від тиску); АВ – рівновага двох твердих фаз (залежність температури переходу сірки ромбічної в сірку моноклінну під дією тиску).

#### *Двокомпонентні системи, поняття про фізико-хімічний аналіз*

Властивості двокомпонентних систем можна описати трьома незалежними змінними, наприклад,  $P$ ,  $T$  і  $X_1$ . Мольна частка іншого компонента  $X_2$  залежна, оскільки  $X_1 + X_2 = 1$ .

Отже, стан двокомпонентної системи графічно зображується у тривимірному просторі. Згідно з правилом фаз у двокомпонентній системі можуть одночасно міститися не більше чотирьох рівноважних фаз. У такій системі буде  $C = 2 + 2 - 4 = 0$  ступенів свободи. Це інваріантна система, вона зображується точкою у просторі чотирьох вимірів, що називається *четверною точкою*.

Якщо змінити одну зі змінних, то зникне одна з фаз, і отримаємо трифазну систему з одним ступенем вільності. На діаграмі вона зображується лінією. Таких ліній із кожною почетверною точкою сполучено чотири, оскільки зникнути може будь-яка з чотирьох фаз.

Якщо у трифазній моноваріантній системі змінити довільно дві змінні, то зникне ще одна фаза й виникне двофазна система, що має  $C = 2 + 2 - 2 = 2$  ступенів свободи. Це диваріантна система, що на діаграмі стану зображується поверхнею. Таких поверхонь, що сполучені з даною почетверною точкою, може бути шість.

Якщо у будь-якій двофазній системі змінювати три змінні, то зникне ще одна фаза і система набуде однофазного стану. Матиме  $C = 2 + 2 - 1 = 3$  ступені вільності, тобто буде триваріантною. З четверною точкою будуть сполучені чотири такі системи.

Просторове розміщення всіх цих можливих систем на тривимірній діаграмі стану подати майже неможливо. На практиці, як правило, розглядаються більш прості випадки, коли  $P$  або  $T$  постійні, або коли тиск відіграє малу роль, як, наприклад, у рідких і твердих фазах, тобто у конденсованих системах. У цих випадках правило фаз має вигляд  $C = K - \Phi + 1$ . Тоді залишаються дві незалежні змінні (наприклад,  $T$  і  $X$ ) і діаграму стану в цьому випадку можна зобразити на площині.

Вивчення двокомпонентних систем, що утворюють декілька фаз, здійснюється за допомогою фізико-хімічного аналізу. Фізико-хімічний аналіз базується на вивченні залежності між фізичними властивостями хімічної рівноважної системи й чинниками, що визначають її рівновагу. За властивості, що вивчаються, можуть бути вибрані: теплові, електричні, оптичні, механічні тощо.

Залежності, знайдені експериментальним шляхом, зображують у вигляді діаграми стану склад – властивість. Властивість, як правило, відкладають на осі ординат, а склад – на осі абсцис. При цьому зручно використовувати дві осі ординат.

Найпоширенішим виглядом фізико-хімічного аналізу є термічний аналіз, що є методом визначення температури, при якій у рівноважній системі змінюється кількість фаз. На рис. 2 наведений принцип побудови діаграми стану за допомогою термічного аналізу.

На рис. 3 подані криві охолодження розплавів або розчинів різного складу. За кривими охолодження побудована діаграма стану двокомпонентної системи.

Фазова рівновага в однокомпонентних та двокомпонентних системах є фундаментальною концепцією фізичної хімії, що дозволяє описувати стан

речовини та передбачати її поведінку за різних умов температури та тиску. В однокомпонентних системах, які складаються з однієї речовини, можливо існування різних агрегатних станів – твердого, рідкого та газоподібного, а також поліморфних модифікацій твердих фаз, як-от ромбічна і моноклінна сірка, біле та сіре олово. Стан такої системи повністю визначається двома незалежними змінними, зазвичай температурою та тиском, тоді як інші параметри, такі як об'єм або густина, є функціями цих змінних.

Для наочного прикладу розглянемо діаграму стану води. Вода як найбільш поширений розчинник є ключовою для більшості фізико-хімічних та промислових процесів, тому знання її фазової поведінки має практичне значення. Згідно з правилом фаз, максимальна кількість фаз, що можуть перебувати у рівновазі в однокомпонентній системі, дорівнює трьом. Такий стан називають потрійною точкою. Для води ця точка відповідає одночасному існуванню льоду, рідкої води та водяної пари при температурі 273,16 К та тиску 609 Па. В системі, що знаходиться в потрійній точці, будь-яка зміна температури або тиску призведе до зникнення однієї з фаз та переходу системи у двофазну область.

Після зникнення твердої фази утворюється двофазна система «рідина – пара», яка моноваріантна та зображується на фазовій діаграмі лінією рівноваги. При зміні температури або тиску система залишатиметься двофазною, проте фігуративна точка на діаграмі зміщуватиметься вздовж кривої. Критична точка цієї кривої позначає умови, за яких рідина перестає існувати окремо від пари, і система стає однорідною. Аналогічно, інші двофазні рівноваги, такі як «лід – пара» або «лід – рідина», описуються кривими на діаграмі стану та підкоряються рівнянню Клапейрона-Клаузіуса, що враховує теплоту фазового переходу та молярні об'єми фаз. Особливість води полягає в аномальній залежності молярного об'єму льоду від рідини, що призводить до нахилу кривої плавлення вліво, тоді як у більшості речовин крива нахилена вправо.

Інший приклад однокомпонентної системи з кількома кристалічними модифікаціями – сірка. У цій системі можна спостерігати чотири фази: рідку, газоподібну та дві кристалічні (ромбічну та моноклінну). На фазовій діаграмі для сірки лінії рівноваги визначають криві двофазних моноваріантних систем, криві переходу між твердими фазами та лінії випаровування/конденсації. Таке представлення дозволяє передбачити стабільність фаз за різних температур та тисків та пояснює, як відбуваються переходи між фазами.

Перейшовши до двокомпонентних систем, стан таких систем описується трьома незалежними змінними, наприклад, температурою, тиском та складом одного з компонентів, тоді як мольна частка другого компонента визначається законом збереження складу. Згідно з правилом фаз, максимальна кількість рівноважних фаз у двокомпонентній системі дорівнює чотирьом, утворюючи інваріантну систему з нульовим числом ступенів свободи, що називається четверною точкою. Зміна будь-якої змінної призводить до зникнення однієї з фаз та переходу у трифазну моноваріантну систему, яка зображується лінією на діаграмі. Подальше зникнення фаз формує двофазні поверхні та однофазні області, відповідно з двома та трьома ступенями свободи.

Практично, об'ємне представлення всіх можливих фазових станів двокомпонентної системи складне, тому для конденсованих систем часто розглядають умови з постійним тиском або температурою, що дозволяє зобразити діаграму стану на площині залежності складу та властивості. Фізико-хімічний аналіз таких систем базується на експериментальному вивченні залежності фізичних властивостей (теплових, оптичних, електричних, механічних) від параметрів рівноваги. Найпоширенішим методом є термічний аналіз, що дозволяє визначати температури фазових переходів за різного складу системи та будувати діаграми стану, на яких криві охолодження або нагрівання плавно зображують утворення та зникнення фаз.

Таким чином, вивчення фазових рівноваг у однокомпонентних і двокомпонентних системах надає систематичний підхід до прогнозування поведінки речовини за змінних умов та є основою для розробки матеріалів, технологічних процесів і фармацевтичних систем. Розуміння таких діаграм дозволяє не лише передбачити стабільність фаз, але й коректно планувати експерименти та виробничі процеси, що залежать від фазових переходів.

### *Діаграми стану найпростіших двокомпонентних систем*

До основних типів діаграм стану двокомпонентних систем із конденсованими фазами належать діаграми з евтектикою, з конгруентно й інконгруентно плавкими хімічними сполуками, з обмеженою і необмеженою розчинністю у твердій та рідкій фазах.

Із правила фаз випливає, що для двокомпонентної системи з конденсованими фазами при постійному тиску кількість ступенів вільності дорівнює  $C = 3 - \Phi$ . При цьому кількість рівноважних фаз не може бути більше трьох (при  $C=0$ ), а кількість ступенів вільності не може бути більше двох (при  $\Phi = 1$ ).

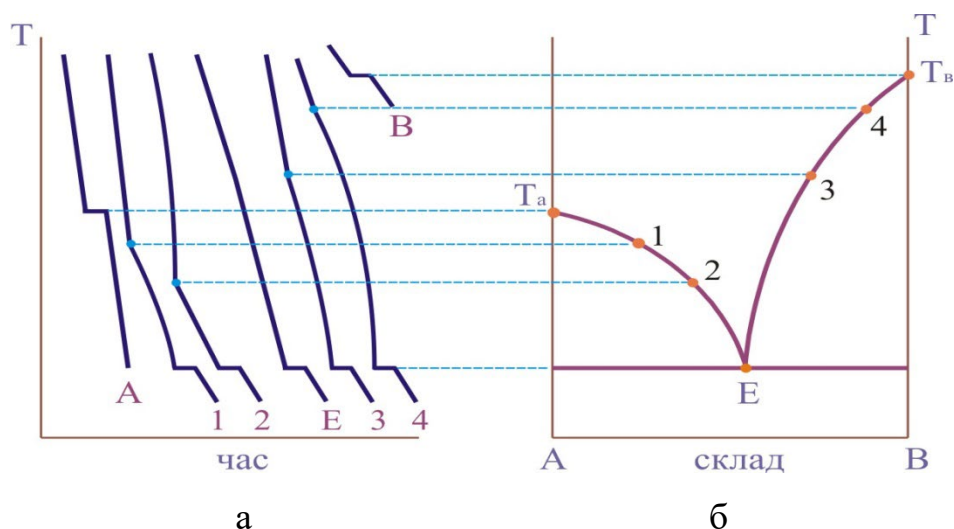


Рис. 4 Ілюстрація принципу фізико-хімічного (термічного) аналізу двокомпонентної системи: а – криві охолодження розплавів різного складу (1-4), на яких фіксуються ізотермічні зупинки, що відповідають фазовим перетворенням; б – діаграма стану системи в координатах «температура –

склад», побудована на основі експериментальних даних, з лініями ліквідуса та солідуса і евтектичною точкою Е (Атрощенко В. І., Мельник О. М. Фізична хімія : навчальний посібник. Львів : Світ, 2008. 528 с.)

### Системи з евтектикою

Діаграма стану такої системи наведена на рис. 5, вона розглядається для розплаву. Все сказане про неї справедливе також для розчину.

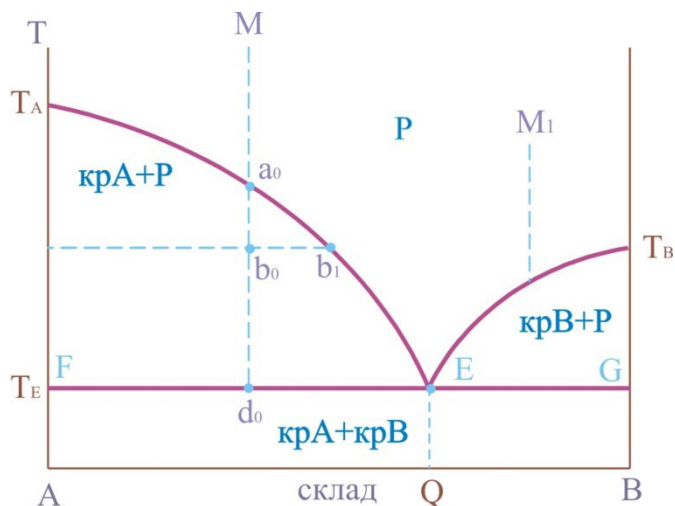


Рис. 5 Фазова діаграма двокомпонентної конденсованої системи евтектичного типу з обмеженою взаємною розчинністю у твердому стані, побудована в координатах «температура – склад». Показані області існування рідкої фази P, двофазних рівноваг крА + P і крВ + P, а також область крА + крВ нижче евтектичної температури; точка Е відповідає евтектичному складу системи (Картель М. Т., Тананайко Ю. М., Ульберг З. Р. Фізична та колоїдна хімія : навчальний посібник для фармацевтичних спеціальностей. Київ : Академперіодика, 2014. 456 с.)

Температури плавлення чистих компонентів А і В позначені точками T<sub>A</sub> і T<sub>B</sub>. Крива T<sub>A</sub>E T<sub>B</sub>, що показує залежність температури кристалізації (плавлення) від складу розплаву, називається лінією *ліквідусу*.

Точка Е показує температуру та склад розплаву, що перебуває в рівновазі одночасно з кристалами речовин А і В. Вона називається *точка евтектики*. Суміш кристалів А і В, що одночасно випадає при температурі

$T_E$ , називається *твердою евтектикою*. Остання складається з двох твердих фаз (кристалів А і В).

Лінія FEG називається лінією *солідусу*. Нижче цієї лінії розміщена гетерогенна область кристалів А і В. На самій лінії солідусу система складається з трьох фаз – кристалів А і В та розплаву складу Q.

Вище лінії ліквідусу міститься область розплаву, нижче лінії солідусу – суміш кристалів А і В. Точки всередині трикутників  $T_{AEF}$  і  $T_{BEG}$  відповідають гетерогенним системам, що складаються із розплаву і кристалів А або із розплаву і кристалів В відповідно.

Розглянемо процес охолодження розплаву, що заданий фігуративною точкою М. У цій точці маємо біваріантну систему ( $\Phi = 1$ ,  $C = 3 - 1 = 2$ ), тобто можна змінювати довільно і температуру, і склад системи, а все одно система залишиться однофазною.

Зі зниженням температури до точки  $a_0$  починається випадіння перших кристалів речовини А. При цьому система стає двофазною та моноваріантною ( $C=3 - 2=1$ ). Це означає, що можна змінювати тільки один параметр (температуру або склад) так, щоб система залишалася двофазною. Зі зниженням температури, наприклад, склад розплаву буде змінюватися за кривою  $T_{AE}$ .

Якщо систему охолодити до температури, що відповідає точці  $v_0$ , то в результаті виділення із розплаву деякої кількості кристалів речовини А розплав збагатиться компонентом В. Хоча у цій точці система залишається двофазною моноваріантною, склад розплаву визначається точкою  $v_1$ .

При температурі, що відповідає точці  $d_0$ , із розплаву починають виділятися кристали компонента В і система стає трифазною, інваріантною. Значення  $C = 0$  показує, що три дані фази (розплав та кристали компонентів А і В) можуть перебувати в рівновазі тільки за цілковито визначених умов, коли температура дорівнює евтектичній температурі  $T_E$ , а розплав має евтектичний склад Q (точка E). Ані температуру, ані склад розплаву не можна змінювати довільно, не змінюючи кількості фаз.

Процес кристалізації в точці  $d_0$  при температурі  $T_E$  завершується повним застиганням рідкого розплаву. В системі залишаються дві тверді фази (кристали А і В) і кількість ступенів вільності  $C = 3 - 2 = 1$ . Це означає, що температура може змінюватися довільно, оскільки склад фаз уже не є змінним.

Якщо охолоджувати розплав, заданий фігуративною точкою  $M_1$ , то на відміну від описаних процесів при досягненні лінії ліквідусу почнуть викристалізовуватися кристали компонента В.

### *Системи з конгруентно плавкою хімічною сполукою*

У ряді випадків при застиганні із розплаву кристалізуються хімічні сполуки. При цьому система, як правило, залишається двокомпонентною. Ці сполуки можуть бути достатньо стійкими, так що будуть плавитися як окрема речовина, тобто конгруентно.

Діаграма стану двокомпонентної системи, у якій утворюється конгруентно плавка хімічна сполука, наведена на рис. 6. Компоненти А і В утворюють хімічну сполуку АВ. Цьому складу відповідає максимум на лінії ліквідусу. З рисунка простежується, що діаграма розбивається на дві діаграми з евтектикою, тобто маємо дві різні діаграми: А – АВ і АВ – В. Аналіз окремих діаграм приводить до таких самих результатів, як це описано в попередньому підрозділі. Зупинимось на особливостях.

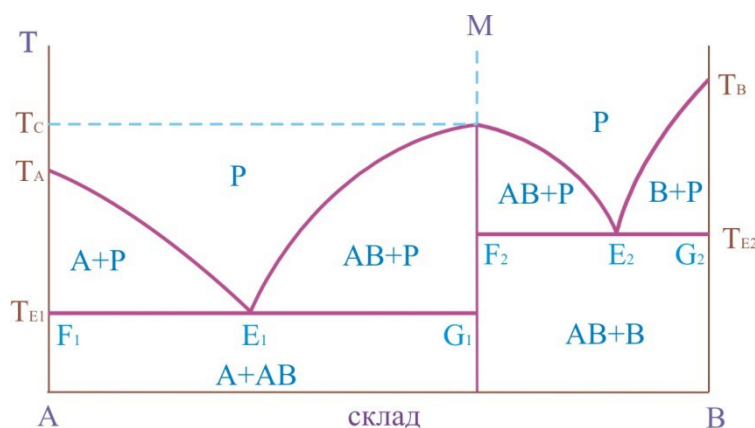


Рис. 6 Діаграма стану системи з конгруентноплавкою хімічною сполукою (Картель М. Т., Тананайко Ю. М., Ульберг З. Р. Фізична та

колоїдна хімія : навчальний посібник для фармацевтичних спеціальностей.  
Київ : Академперіодика, 2014. 456 с.)

Розглянемо процес охолодження розплаву, що заданий фігуративною точкою М і відповідає складу конгруентно-плавкої хімічної сполуки АВ. За цим складом кількість незалежних компонентів дорівнює одиниці, оскільки система може бути утворена із однієї хімічної сполуки АВ. При температурі  $T_C$  із розплаву випадають кристали АВ і кількість ступенів вільності дорівнює  $C = 1 - 2 + 1 = 0$ , тобто система інваріантна і кристалізується при постійній температурі.

#### *Системи з інконгруентно-плавкою хімічною сполукою*

Діаграма стану двокомпонентної системи, у якій компоненти А і В можуть утворювати сполуку АВ, що плавиться інконгруентно, тобто із розкладанням, наведена на рис. 7. Інконгруентно плавка хімічна сполука АВ стійка тільки при температурі нижче  $T_C$ .

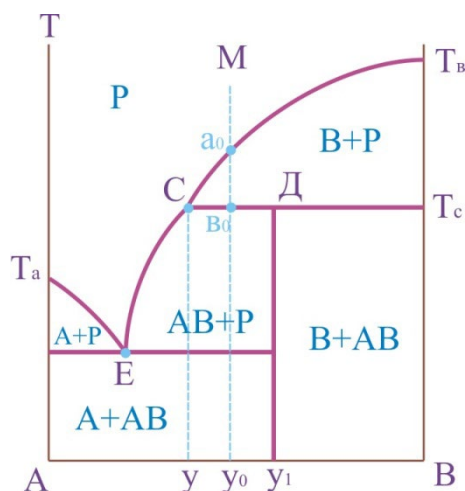


Рис. 7. Фазова діаграма стану двокомпонентної системи (А-В) з утворенням нестійкої хімічної сполуки (АВ), що плавиться інконгруентно:  $T_a$ ,  $T_b$  – температури плавлення чистих компонентів А та В; Р – область існування рідкої фази (розплаву); С – перитектична точка (точка інконгруентного плавлення), де відбувається реакція: Рідниа С + В = АВ;  $T_c$  – Д – лінія перитектичної рівноваги (ізотерма); Е – точка евтектики, де

кристалізується механічна суміш  $A + AB$ ; вертикаль  $y_1$  – склад хімічної сполуки  $AB$ ;  $M$  – фігуративна точка, що показує процес охолодження розплаву складу  $y_0$ . При охолодженні вздовж цієї лінії: у точці  $a_0$  починається кристалізація компонента  $B$ ; у точці  $b_0$  (на перитектичній лінії) відбувається перетворення раніше випавших кристалів  $B$  на хімічну сполуку  $AB$  (Білий О. В. Фізична хімія : підручник. Київ : Видавництво Ліра-К, 2013. 368 с.)

При охолодженні розплаву складу  $M$  у точці  $a_0$ , що міститься на лінії ліквідусу, почнеться виділення із розплаву кристалів компонента  $B$ . У інтервалі температур між точками  $a_0$  і  $b_0$  система є двофазною і моноваріантною:

$$C=3-2=1$$

У точці  $b_0$  при температурі  $T_C$  починається і продовжується кристалізація сполуки  $AB$ , склад якої відповідає точці  $y_1$ . При цьому в рівновазі перебувають три фази: розплав, кристали  $AB$  і  $B$ . Кількість ступенів вільності дорівнює нулю:  $C=3-3=0$ , що свідчить про постійність температури  $T_C$ , складу розплаву (точка  $C$ ) і складу хімічної сполуки  $y_1$  (точка  $D$ ). Щоб склад розплаву не змінювався, одночасно із кристалізацією  $AB$  кристали  $B$ , що випали раніше, повинні розчинятися, підтримуючи постійним вміст компонента  $B$  у розплаві. Точка  $C$  – точка *перитектики*.

У перитектичній точці (так само, як і в евтектичній) у рівновазі перебувають розплав та дві тверді фази. Однак процеси при охолодженні трифазної системи істотно відрізняються. У евтектичній точці одночасно випадають дві тверді фази, а в перитектичній – одна тверда фаза випадає, а інша розчиняється.

Процес охолодження в точці  $b_0$  закінчується розчиненням усіх кристалів  $B$ , що випали раніше. Залишається двофазна система, що складається із розплаву і кристалів  $AB$ . Кількість ступенів свободи  $C = 3 - 2 = 1$ . Температура при охолодженні двофазної системи знижується, і

з розплаву випадають кристали АВ. При цьому кожній температурі відповідає визначений склад розплаву (крива СЕ). Подальше охолодження розплаву описується діаграмою стану А – АВ з евтектикою.

### *Системи з твердими розчинами*

Дотепер розглядалися системи, в яких із розплаву, як правило, кристалізувалася тверда фаза визначеного складу: або чисті компоненти, або хімічні сполуки. Однак це далеко не завжди так. Часто з розплаву випадає тверда фаза змінного складу – тверді розчини.

*Твердими розчинами* називають однорідні системи змінного складу, що складаються з двох і більше компонентів.

Тверді розчини можуть утворюватися двома шляхами: або атоми другого компонента містяться в міжвузлях кристалічної решітки першого компонента, або можуть заміщати атоми першого компонента у вузлах кристалічної решітки. Перший тип розчинів називається *твердими розчинами проникнення*, другий – *твердими розчинами заміщення*.

Діаграма стану системи з необмеженою розчинністю компонентів А і В у рідкому та твердому станах наведена на рис. 8. Нижче лінії солідусу  $T_{AC_0}T_B$  міститься область існування твердих розчинів. Вище лінії ліквідусу  $T_{AC_1}T_B$  міститься область рідких розчинів. Між лініями ліквідусу та солідусу міститься область рівноважного співіснування рідких та твердих розчинів.

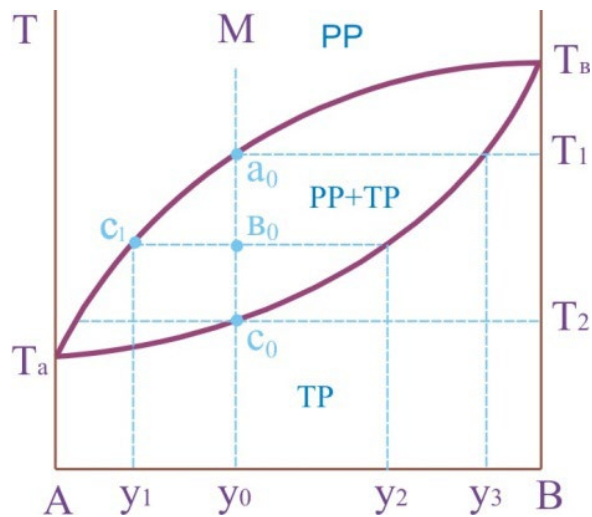


Рис. 8 Діаграма стану двокомпонентної системи з необмеженою взаємною розчинністю компонентів у рідкому (PP) та твердому (TP) станах, що характеризується утворенням неперервного ряду твердих розчинів. Верхня крива  $T_a$ – $T_b$  є лінією ліквідусу, вище якої система знаходиться в повністю рідкому стані, а нижня крива є лінією солідусу, нижче якої існує лише однорідний твердий розчин. Область між цими кривими (PP+TP) є двофазною, де співіснують рідина та кристали. Пунктирна вертикаль M показує шлях охолодження розплаву складу  $y_0$ : кристалізація починається в точці  $a_0$  з випадіння кристалів складу  $y_3$ , продовжується зі зміною складів обох фаз уздовж ліній ліквідусу та солідусу (наприклад, рівновага в точках  $c_1$  і  $b_0$ ) і завершується в точці  $c_0$  повним затвердінням сплаву (Гомонай В. І. Фізична та колоїдна хімія : підручник для ВНЗ. Вінниця : Нова Книга, 2016. 496 с.)

Розглянемо охолодження розплаву, що позначається фігуративною точкою M. У цій точці система біваріантна ( $C = 3 - 1 = 2$ ).

При температурі  $T_1$  у точці  $a_0$  починається кристалізація твердого розчину і утворюється двофазна система, що складається із розплаву складу  $y_0$  і твердого розчину складу  $y_3$ .

В інтервалі температур  $T_1 - T_2$  кількість ступенів вільності системи дорівнює одиниці й кожній температурі відповідають визначені склади

рідкого та твердого розчинів. Наприклад, система складу  $y_0$  у фігуративній точці  $v_0$  складається із двох фаз: рідкого розчину складу  $y_1$  і твердого розчину складу  $y_2$ .

Маси фаз, що перебувають у рівновазі, можна знайти використовуючи правило важеля:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{y_2 - y_0}{y_0 - y_1} \text{ і } m_1 + m_2 = m_0,$$

де:  $m_0$  – вихідна маса системи;

$m_1$  і  $m_2$  – маси рідкого та твердого розчинів.

Повне затвердіння розплаву відбудеться при температурі  $T_2$ . При цьому склад  $y_0$  твердого розчину (точка  $c_0$ ) відповідає складу  $y_0$  вихідного розплаву (точка  $a_0$ ). Відзначимо, що на діаграмі немає ні однієї точки, де в рівновазі перебували б три фази і кількість ступенів вільності дорівнювала б нулю.

Крім поданої діаграми, спостерігаються діаграми стану з обмеженою розчинністю компонентів у твердому вигляді. Дві такі діаграми наведені на рис. 9. Не аналізуючи ці діаграми, уточнимо, що в обох випадках утворюються два типи твердих розчинів ( $\alpha$  і  $\beta$ ). У системі а тверді розчини  $\alpha$  і  $\beta$  плавляться без розкладання, а у системі б твердий розчин існує лише при температурах, менших від  $T_C$  (різниця така сама, як і між системами з конгруентно та інконгруентно плавкими хімічними сполуками).

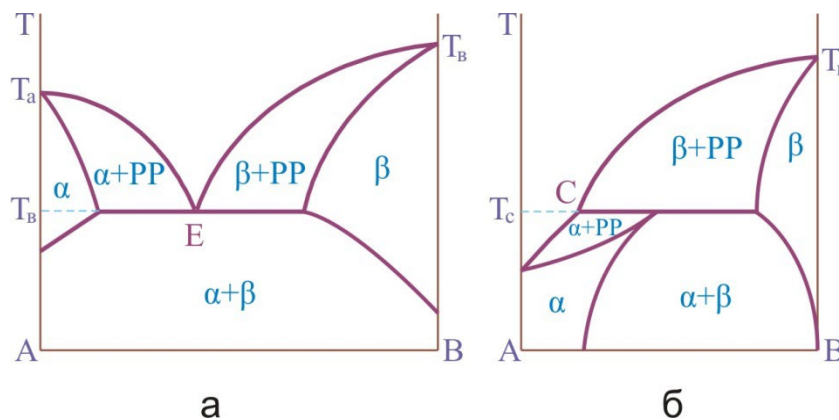


Рис. 9 Фазова діаграма стану двокомпонентної системи з утворенням хімічної сполуки АВ, що плавиться інконгруентно (з розкладанням). Крива

ліквідусу складається з двох гілок, що сходяться в перитектичній точці С та евтектичній точці Е. Характерною ознакою є наявність перитектичної горизонталі С–Д (ізотерма  $T_c$ ), яка відповідає температурі, при якій відбувається перитектична реакція: взаємодія рідкого розплаву Р з кристалами компонента В з утворенням твердої хімічної сполуки АВ. Вертикальна лінія, що проходить через точку  $u_1$ , вказує на стехіометричний склад цієї сполуки, а області нижче лінії солідусу відображають співіснування твердих фаз: суміші кристалів А і АВ та суміші кристалів В і АВ (Картель М. Т., Тананайко Ю. М., Ульберг З. Р. Фізична та колоїдна хімія : навчальний посібник для фармацевтичних спеціальностей. Київ : Академперіодика, 2014. 456 с.)

#### *Система з обмеженою розчинністю в рідкій фазі*

Багато рідин змішуються в будь-яких пропорціях. Це суміші з водою етанолу, ацетону, оцтової кислоти, суміші бензолу з толуолом, гексаном тощо. У інших випадках рідини розчиняються лише частково, утворюючи два насичені розчини: розчин першої рідини у другій та розчин другої рідини у першій.

На рис. 10 наведена діаграма стану системи «анілін – вода», компоненти якої мають обмежену взаємну розчинність. Крива АВ показує залежність складу водного шару від температури, крива ВС – залежність складу анілінового шару від температури.

З підвищенням температури збільшується взаємна розчинність води та аніліну й обидва шари набувають однакового вигляду за складом. Криві зливаються в точці В. Температура, вище якої обидві рідини змішуються у будь-яких співвідношеннях, називається *верхньою критичною температурою розчинення*. За межами кривої АВС міститься область однофазних систем (розчинів), усередині кривої – область розшарування. Наприклад, у точці  $a_0$  система складається із двох шарів: водного шару складу  $a_1$  і анілінового шару складу  $a_2$ . Усередині кривої  $\Phi = 2$ ,  $C = 1$ , поза

кривою –  $\Phi = 1$ ,  $C = 2$ . Якщо крива, яка обмежує область розшарування, проходить через мінімум, то температура  $T_K$  називається *нижньою критичною температурою розчинення*.

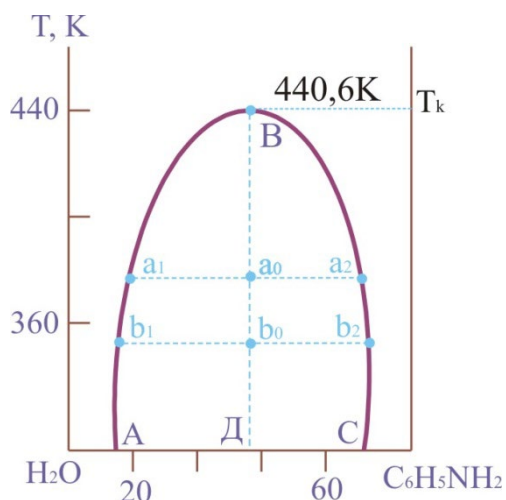


Рис. 10 Фазова діаграма взаємної розчинності рідин у двокомпонентній системі вода (H<sub>2</sub>O) – анілін (C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>NH<sub>2</sub>) з верхньою критичною температурою розчинення. Крива А–В–С є бінодаллю, яка розмежовує гомогенну область необмеженої взаємної розчинності компонентів (розміщену над кривою) та гетерогенну область розшарування (розміщену всередині купола), де співіснують дві рівноважні рідкі фази. Максимум бінодальної кривої (точка В) відповідає верхній критичній температурі розчинення ( $T_K = 440,6$  К), вище якої компоненти змішуються в будь-яких співвідношеннях. Горизонтальні відрізки  $a_1$ – $a_2$  та  $b_1$ – $b_2$  є конодами, кінці яких вказують на рівноважні склади насичених розчинів (водного шару та анілінового шару) при відповідних температурах, а точки  $a_0$  та  $b_0$  відповідають валовому складу гетерогенної суміші (Капуцький Ф. М., Судер Є. Є. Фізична хімія : підручник. Київ : Знання, 2011. 423 с.)

Маємо такі системи, у яких спостерігається і верхня, і нижня критичні температури розчинення.

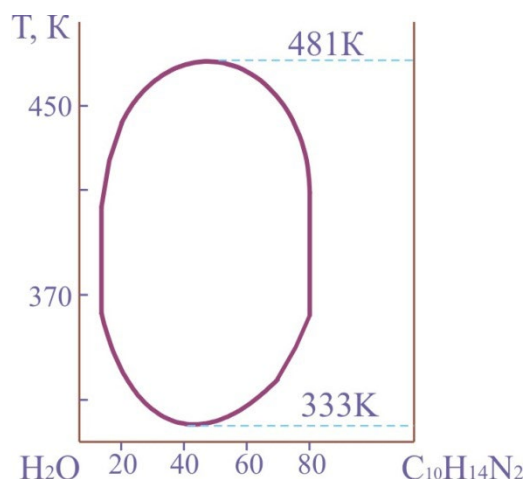


Рис. 11 Фазова діаграма взаємної розчинності рідин у двокомпонентній системі вода ( $\text{H}_2\text{O}$ ) – нікотин ( $\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{N}_2$ ), що характеризується наявністю замкнутої бінодальної кривої. Особливістю даної системи є існування одночасно верхньої ( $T_{\max} = 481 \text{ K}$ ) та нижньої ( $T_{\min} = 333 \text{ K}$ ) критичних температур розчинення. Внутрішня область, обмежена замкнутою кривою, відповідає гетерогенному стану системи, де відбувається розшарування на дві рівноважні рідкі фази, тоді як зовнішня область відповідає гомогенному стану, де компоненти змішуються необмежено (утворюють істинний розчин) при будь-яких концентраціях, якщо температура вища за 481 K або нижча за 333 K (Мчедлов-Петросян М. О. та ін. Колоїдна хімія : підручник. Харків : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2010. 500 с.)

Критичну температуру розчинення на кривій розшарування визначають користуючись правилом прямолінійного діаметра Алексєєва. Згідно з цим правилом середини ліній (коннод), що поєднують фігуративні точки сполучених розчинів ( $a_1$  і  $a_2$ ,  $v_1$  і  $v_2$ ), лежать на прямій лінії (ВД), що проходить через верхню або нижню критичну точку розчину.

Ми розглянули тільки найпростіші двокомпонентні системи. Більшість двокомпонентних систем мають складніші діаграми стану, що є комбінацією з декількох простих діаграм.

Опис і діаграми стану три- та більше компонентних систем можна знайти у спеціальній літературі.

### *Рівновага рідина – пара та розподіл речовин між фазами*

Окрім розглянутих раніше гетерогенних систем, у яких беруть участь тверді фази, виняткове значення для теорії розчинів та практичної фармації мають рівноваги між рідиною та парою. Розуміння закономірностей цих рівноваг є фундаментом для опанування таких важливих технологічних процесів, як перегонка, ректифікація, висушування термолабільних речовин та стабілізація лікарських препаратів.

Стан рівноваги між рідиною та її насиченою парою у двокомпонентних системах визначається трьома параметрами: температурою, тиском та складом. Найпростішим випадком є так звані ідеальні розчини, утворення яких не супроводжується зміною об'єму та тепловим ефектом. Для таких систем діє правило, згідно з яким парціальний тиск насиченої пари кожного компонента над розчином прямо пропорційний його мольній частці в рідині. Це означає, що молекули розчинника та розчиненої речовини випаровуються незалежно одна від одної, і їхня здатність переходити в пару залежить лише від їхньої кількості.

Однак реальні розчини, з якими доводиться працювати на практиці, доволі часто відхиляються від ідеальної поведінки внаслідок міжмолекулярної взаємодії компонентів. Якщо сили притягання між різнорідними молекулами слабші, ніж між однорідними, спостерігається позитивне відхилення – тиск пари над розчином стає вищим за розрахунковий. У протилежному випадку, коли компоненти сильно взаємодіють між собою (наприклад, утворюють водневі зв'язки), виникає негативне відхилення, і загальний тиск пари знижується.

Загальні закони, що пов'язують склад рідкої фази зі складом пари над нею для реальних розчинів, були сформульовані Д. П. Коноваловим. Перший закон Коновалова є ключовим для розуміння процесів розділення рідин. *Він стверджує, що насичена пара, порівняно з рівноважним розчином, завжди збагачена тим компонентом, додавання якого до системи підвищує*

*загальний тиск пари або, що те саме, знижує температуру кипіння суміші при даному тиску.*

Ця закономірність має важливий практичний наслідок: під час кипіння суміші двох летких рідин у парову фазу переходить переважно більш леткий компонент (той, що має нижчу температуру кипіння). Внаслідок цього рідина, що залишається, збагачується на цей компонент, і її температура кипіння поступово зростає. Якщо пару, що утворилася, сконденсувати, ми отримаємо рідину, склад якої відрізняється від вихідної суміші в бік збільшення вмісту низькокиплячого компонента. Багаторазове повторення циклів випаровування та конденсації лежить в основі ректифікації – методу, що дозволяє розділяти рідкі суміші на практично чисті індивідуальні речовини.

Проте існують системи, які неможливо повністю розділити методом перегонки, незалежно від ефективності колонки. Це відбувається у випадках значних відхилень від ідеальності, коли на діаграмах стану «склад – температура кипіння» з'являються точки екстремуму (максимуму або мінімуму). Поведінку таких систем описує другий закон Коновалова, який *стверджує, що в точках екстремуму склад рідини і склад рівноважної пари стають однаковими.* Такі суміші називаються азеотропними або нероздільнокиплячими.

Особливість азеотропів полягає в тому, що під час кипіння їхній склад не змінюється, оскільки пара забирає компоненти в тому ж співвідношенні, в якому вони знаходяться в рідині. Через це азеотропна суміш кипить при постійній температурі, поводячись подібно до чистої хімічної речовини, хоча і є розчином. Класичним прикладом є суміш етилового спирту з водою, яка утворює азеотроп із вмістом спирту близько 96 % та мінімальною температурою кипіння, що нижча за температуру кипіння як чистого спирту, так і води. Отримати абсолютний (100 %) етанол простою перегонкою неможливо – для цього доводиться застосовувати спеціальні методи,

наприклад, змінювати тиск або додавати третій компонент, що руйнує азеотроп.

Логічним продовженням розгляду гетерогенних рівноваг є системи, що складаються з двох рідин, які не змішуються (наприклад, вода та олія або вода та хлороформ), до яких введено третій компонент. Якщо цей третій компонент здатний розчинитися в обох рідких фазах, то за умови сталості температури настає динамічна рівновага. Цей процес описується законом розподілу Нернста.

*Суть закону полягає в тому, що розчинена речовина розподіляється між двома рідинами, що не змішуються, у строго визначеному співвідношенні. Відношення рівноважних концентрацій речовини у верхньому та нижньому шарах є величиною сталою при даній температурі і називається коефіцієнтом розподілу. Важливо зазначити, що це співвідношення не залежить від загальної кількості внесеної речовини, доки розчини залишаються розбавленими і речовина не змінює своєї молекулярної форми (не дисоціює і не асоціює).*

На законі розподілу ґрунтується один із найважливіших методів виділення та очищення речовин у хімічній технології та фармації – екстракція.

Цей метод дозволяє вилучати (екстрагувати) цільову речовину з розчину або твердого матеріалу за допомогою спеціально підібраного розчинника – екстрагента. Знання коефіцієнта розподілу дозволяє оптимізувати цей процес. Зокрема, теоретично і практично доведено, що ефективність вилучення речовини значно зростає, якщо проводити екстракцію не всім об'ємом розчинника одноразово, а розділити його на кілька порцій і провести послідовну багатоступеневу обробку. Це правило є "золотим стандартом" у практиці лабораторного синтезу та фітохімічного аналізу.

## ПРИКЛАДИ РОЗБОРУ ДІАГРАМ

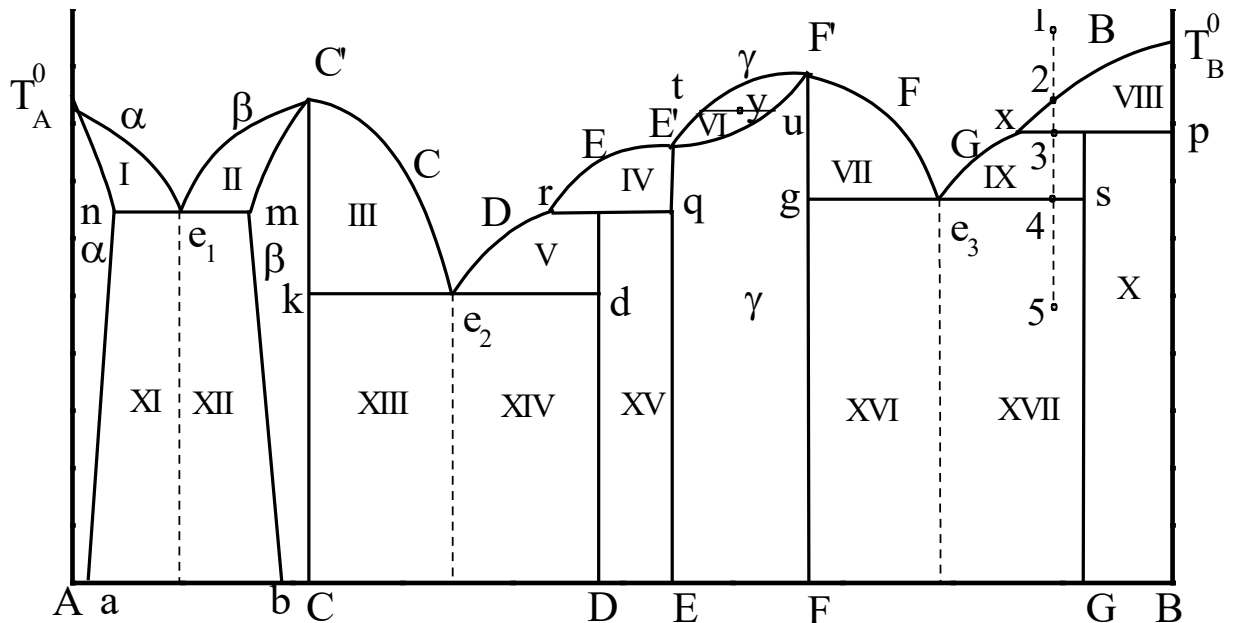
Розібрати діаграму, використовуючи план розбору діаграм двокомпонентних систем.

План розбору діаграми двокомпонентної системи:

1. Знайти хімічні сполуки, позначити їх, визначити склад:
  - а) стійкі;
  - б) нестійкі.
2. Знайти тверді розчини, позначити області їх існування:
  - а) з необмеженою розчинністю;
  - б) з обмеженою розчинністю.
3. Визначити, кристалічна решітка якого компоненту збережена.
4. Визначити і підписати ділянки лінії ліквідуса, де кристалізуються сполуки і тверді розчини.
5. Визначити фази в областях, прилеглих до ділянок лінії ліквідуса.
6. Визначити наявність евтектик. Їх склад: якісний (що спільно кристалізується) і кількісний (% А і % В).
7. Визначити перитектичні перетворення, перитектичну лінію. Що кристалізується і що розчиняється?
8. Визначити монотектичні перетворення.
9. Визначити фази у всіх інших областях.

10. Для будь-якої крапки на діаграмі визначити: число фаз; склад фаз; відносну кількість фаз; число ступенів свободи.

11. Для розчину будь-якого складу провести охолодження і вміти зобразити криву охолодження.



1. У даній системі є три стійкі сполуки (C, E, F) і два нестійких (D, G). Стійким відповідають конгруентні точки їх плавлення ( $C^I$ ,  $E^I$ ,  $F^I$ ), а нестійким – лінії розкладання речовин при їх нагріванні (rq і xp). Склад сполук визначається по осі складу (% A і % B).

2. Є три області існування твердих розчинів:

1) з необмеженою розчинністю один в одному речовин E і F ( $\gamma$  – твердий розчин). Кристалічна решітка обох сполук однакова, ці ж грати має і  $\gamma$  –розчин.

2) два тверді розчини з обмеженою розчинністю –  $\alpha$  – твердий розчин із збереженням кристалічної решітки A і  $\beta$  – твердий розчин із збереженням грат C.

3. На діаграмі підписані ділянки лінії ліквідуса і що починає кристалізуватися на них.

4. В областях, прилеглих до цих ділянок лінії ліквідуса, існує в рівновазі дві фази: тверда (пункт 3) і рідка, така, що відповідає лінії ліквідуса.

5. У системі є три евтектики:  $e_1$ ,  $e_2$  і  $e_3$ . Якісний склад (що спільно кристалізується) визначається крапками на кінцях евтектичної лінії:

$e_1$ : лінія  $mn$ ; спільно кристалізуються тверді насичені розчини  $\alpha$  (склад « $n$ ») і  $\beta$  (складу « $m$ »);

$e_2$ : лінія  $kd$ ; кристалізуються сполуки «С» і «Д».

$e_3$ : лінія  $gs$ ; кристалізуються сполуки F і G.

Склад евтектик (% A і % B) визначається проектуванням точок  $e_1$ ,  $e_2$  і  $e_3$  на вісь складу.

6. Перитектичні перетворення відбуваються при охолодженні розчинів на перитектичних лініях  $rq$  і  $xr$ .

На лінії  $rq$  кристалізується нестійка речовина «Д», що призводить до розчинення раніше випавших (в області IV) кристалів E.

На лінії  $xr$  кристалізується нестійка сполука «G», що викликає розчинення раніше випавших (в області VIII) кристалів B.

7. Монотектичних перетворень немає.

8. В областях нижче за евтектичні лінії знаходяться по дві тверді фази: нижче за лінію  $mn$  –  $\alpha$  і  $\beta$  тверді розчини;  $kd$  – тверді C і D;  $gs$  – сполуки F і G. Ці фази можуть бути або в чистому вигляді, або входити до складу евтектики.

Так в області XI –  $\alpha + E$  ( $\alpha + \beta$ )

XII -  $\beta + E$  ( $\alpha + \beta$ ); XIII – C + E (C + D); XIV – D + E (C + D)

В області XV дві тверді фази D і E, в області X – дві тверді фази G і Ст.

9. Для точки «у» в області VI: число фаз – дві (твердий розчин  $\gamma$  складу « $u$ » і рідкий розчин складу « $t$ »). Проектуючи точки « $u$ » і « $t$ » на вісь складу, знаходимо % A і % B в цих фазах.

Відносна кількість фаз визначається по конноді «tu», яка береться за 100%:  $\frac{m_{me}}{m_p} = \frac{ty}{yu}$ . Число ступенів свободи розраховується за правилом фаз

Гіббса:  $C = K - f + n = 2 - 2 + 1 = 1$ . Система моноваріантна.

10. Проведемо охолодження розчину 1.

Від крапки 1 до 2 йде охолодження рідкої системи без фазових перетворень.

Від 2 до 3 – кристалізується В, при цьому склад рідини змінюється від точки 2 до х. В точці 3 - перитектичне перетворення: утворення G і розчинення В; склад рідкої фази не змінюється (точка х). Після закінчення процесу залишається в надлишку рідка фаза.

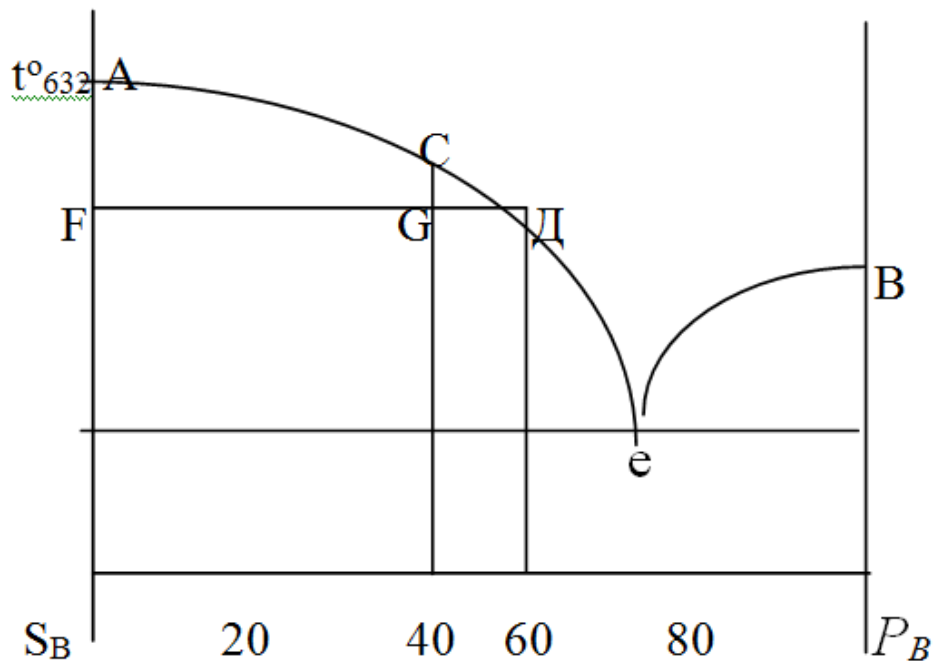
Від точки 3 до 4 – кристалізується G, склад рідкої фази змінюється від точки х до e3.

У точці 4 – евтектичний процес, сумісна кристалізація F і G.

Нижче за точку 4 – охолодження системи (F + G) без фазових перетворень.

На будь-якій діаграмі двокомпонентних систем горизонтальні лінії відповідають рівновазі трьох фаз (одна рідка і дві тверді); такі системи інваріантні ( $C = 0$ ). На кривих охолодження це відобразиться у вигляді горизонтальних ділянок ( $T = \text{const}$ ). На розглянутій діаграмі таких п'ять ліній: mn, rq, gs, sp, kd.

2. Користуючись діаграмою стану  $S_B - P_B$  (див. мал.), визначити кількість стибію, що викристалізувався при охолодженні до  $430^\circ \text{C}$  рідкого сплаву з вмістом 40% свинцю.



Діаграма стану  $S_B - P_B$

**Розв'язання:**

Якщо сплав, що містить 40% свинцю, охолодити до  $430^\circ \text{C}$ , тоді стан його буде відображатися точкою  $G$ . По мірі кристалізації стибію відсотковий вміст свинцю в рідкому сплаві зростає до 60%. Визначимо масу стибію, що викристалізувався через  $p$ , масу рідкого сплаву через  $P$ . Відповідно до правила важіля (або правила відрізків), кількість фази, що викристалізувалась ( $p$ ) так відноситься до кількості взятого рідкого сплаву ( $P$ ), як відрізок, що прилягає до кривої кристалізації  $GD$ , до відрізка  $FD$ , який характеризує склад рідкої фази при охолодженні до заданої температури.

$$p/P = GD/FD,$$

звідси  $p = P(GD/FD)$ . Згідно з малюнком виходить, що  $FD = 60$ ,  $GD = 60 - 40 = 20$

$$p = 3(20/60) = 1 \text{ кг}$$

Тоді при охолодженні 3 кг рідкого сплаву з вмістом 40% свинцю виділиться в вигляді кристалів 1 кг стибію.

## РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

### *Основна:*

1. Фізична та колоїдна хімія. Хімічна термодинаміка: навчальний посібник для студентів спеціальності «Фармація, промислова фармація» / А. Г. Каплаушенко, Ю. Г. Самелюк, Ю. С. Фролова. – Запоріжжя : [ЗДМФУ], 2023. - 97 с.
2. Фізична та колоїдна хімія. Колігативні властивості розчинів: навчальний посібник для студентів спеціальності «Фармація, промислова фармація» / А. Г. Каплаушенко, Ю. Г. Самелюк, Ю. С. Фролова. – Запоріжжя : [ЗДМФУ], 2023. - 99 с.
3. Фізична та колоїдна хімія. Термодинаміка фазових рівноваг: навчальний посібник для студентів спеціальності «Фармація, промислова фармація» / А. Г. Каплаушенко, Ю. Г. Самелюк, Ю. С. Фролова. – Запоріжжя : [ЗДМФУ], 2023. - 90 с.
4. Фізична та колоїдна хімія. Електроодні процеси та їх застосування у фармації: навчальний посібник для студентів спеціальності «Фармація, промислова фармація» / А. Г. Каплаушенко, Ю. Г. Самелюк, Ю. С. Фролова. – Запоріжжя : [ЗДМФУ], 2023. - 93 с.
5. Фізична та колоїдна хімія. Кінетичні закономірності перебігу хімічних реакцій: навчальний посібник для студентів спеціальності «Фармація, промислова фармація» / А. Г. Каплаушенко, Ю. Г. Самелюк, Ю. С. Фролова. – Запоріжжя : [ЗДМФУ], 2023. - 106 с.
6. Physical and colloidal chemistry. (Фізична і колоїдна хімія). Збірник тестів для студентів фармацевтичних факультетів. / Каплаушенко А.Г., Авраменко А.І., Самелюк Ю.Г., Довбня Д.В. – Запоріжжя, 2025. – 161 с. (англ.).
7. Фізична та колоїдна хімія. Збірник тестів для студентів II-III курсів фармацевтичних факультетів спеціальностей «Фармація», «ТПКЗ». /

Каплаушенко А.Г., Авраменко А.І., Самелюк Ю.Г., Довбня Д.В. – Запоріжжя, 2025. – 111 с.

8. Фізична та колоїдна хімія. Електродні процеси та їх застосування у фармації : навчальний посібник для практичних занять студентів та студентів-іноземних громадян II курсу фармацевтичних факультетів спеціальності «Фармація, промислова фармація» / А. Г. Каплаушенко, Ю. Г. Самелюк, Ю. С. Фролова. – Запоріжжя : [ЗДМУ], 2021. – 76 с.

9. Фізична та колоїдна хімія. Кінетичні закономірності перебігу хімічних реакцій: навчальний посібник для практичних занять студентів та студентів-іноземних громадян II курсу фармацевтичних факультетів спеціальності «Фармація, промислова фармація» / А. Г. Каплаушенко, Ю. Г. Самелюк, Ю. С. Фролова. – Запоріжжя : [ЗДМУ], 2021. – 102 с.

10. Фізична та колоїдна хімія. Поверхневі явища. Сорбційні процеси та їх застосування у фармації: навчальний посібник для практичних занять студентів та студентів-іноземних громадян III курсу фармацевтичних факультетів спеціальності «Фармація, промислова фармація» / А. Г. Каплаушенко, Ю. Г. Самелюк, Ю. С. Фролова. – Запоріжжя : [ЗДМУ], 2021. - 72 с.

11. Фізична та колоїдна хімія. Мікрогетерогені системи : в 2-х ч. Ч.1 : навчальний посібник для практичних занять студентів та студентів-іноземних громадян III курсу фармацевтичних факультетів спеціальності «Фармація, промислова фармація» / А. Г. Каплаушенко, Ю. Г. Самелюк, Ю. С. Фролова. – Запоріжжя : [ЗДМУ], 2021. - 82 с.

12. Фізична та колоїдна хімія. Мікрогетерогені системи : в 2-х ч. Ч. 2 : навчальний посібник для практичних занять студентів та студентів-іноземних громадян III курсу фармацевтичних факультетів спеціальності «Фармація, промислова фармація» / А. Г. Каплаушенко, Ю. Г. Самелюк, Ю. С. Фролова. – Запоріжжя : [ЗДМУ], 2021. - 80 с.

13. Фізична та колоїдна хімія. Методи одержання, властивості та застосування у фармації колоїдних систем : навчальний посібник для

практичних занять студентів та студентів-іноземних громадян III курсу фармацевтичних факультетів спеціальності «Фармація, промислова фармація». / А. Г. Каплаушенко, Ю. Г. Самелюк, Ю. С. Фролова. – Запоріжжя : [ЗДМУ], 2021. - 81 с.

14. Фізична та колоїдна хімія. Розчини високомолекулярних сполук: навчальний посібник для практичних занять студентів та студентів-іноземних громадян III курсу фармацевтичних факультетів спеціальності «Фармація, промислова фармація» / А. Г. Каплаушенко, Ю. Г. Самелюк, Ю. С. Фролова. – Запоріжжя : [ЗДМУ], 2021. - 91 с.

*Допоміжна:*

1. Дягілева С. В. Колоїдна хімія : навчальний посібник. Дніпро : ДВНЗ «ПДАБА», 2020. 151 с.

2. Грицай О. С., Плескач В. В., Кузнєцова О. В. Фізична та колоїдна хімія : практикум для здобувачів вищої освіти освітнього ступеня «бакалавр» / за заг. ред. О. В. Кузнєцової. Київ : НУХТ, 2022. 248 с.

3. Косогоров В. А., Шкавро Л. М., Кузнєцов В. Б. Фізична та колоїдна хімія : навчальний посібник. Харків : НТУ «ХПШ», 2021. 216 с. (Це комплексний посібник, який включає розділ про дисперсні системи).

4. Войтенко О. В., Колісник О. М., Колісник В. Б. Фізична та колоїдна хімія : навчальний посібник. Полтава : Полтавська державна аграрна академія, 2020. 273 с.

5. Бабкіна О. С., Смирнова І. М., Колісник В. О. Фізична та колоїдна хімія. Частина I. Фізична хімія : навчальний посібник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 312 с.

6. Плескач В. В., Кузнєцова О. В. Хімія поверхневих явищ і дисперсних систем : навчально-методичний посібник. Київ : НУХТ, 2023. 180 с.

7. Ільїн В. В., Прокопова Л. Л. Фізична та колоїдна хімія: Практикум : навчальний посібник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 157 с.

8. Благун М. С., Благун Н. С. Фізична хімія : навчальний посібник для самостійної роботи. Львів : Львівський національний університет природокористування, 2021. 142 с.

9. Гусаченко В. В., Романовська О. В., Калабіна О. І. Фізична та колоїдна хімія : навчальний посібник. Суми : Сумський національний аграрний університет, 2022. 187 с.

10. Карпінська О. В., Куцевол А. В. Фізична та колоїдна хімія. Частина I : навчально-методичний посібник. Київ : НУБіП України, 2021. 307 с.

11. Мчедлов-Петросян В. О., Лебідь В. І. та ін. Фізична хімія. Колоїдна хімія : підручник. Харків : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2015 588 с.)

12. Ульберг З. Р., Тананайко Ю. М., Картель М. Т. Колоїдна хімія : підручник. Київ : Академперіодика, 2016. 416 с.)