

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ХІМІКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

ДО ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ
З ДИСЦИПЛІНИ "ФІЗИЧНА ТА КОЛОЇДНА ХІМІЯ"
ЗА ОСВІТНІМ РІВНЕМ «БАКАЛВР»
ДЛЯ СТУДЕНТІВ СПЕЦІАЛЬНОСТІ «226 – ФАРМАЦІЯ»

Затверджено на засіданні
кафедри фізичної хімії.
Протокол № 9 від 14.05.2019р.

Дніпро ДВНЗ УДХТУ 2020

Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни «Фізична та колоїдна хімія» за освітнім рівнем «Бакалвр» для студентів спеціальності «226 – Фармація» / Укл. Д.В. Гиренко, В.С. Проценко. – Д.: ДВНЗ УДХТУ, 2020. – 38 с.

Укладачі: Д.В. Гиренко, к.х.н.
В.С. Проценко, д.х.н.

Відповідальний за випуск О.Б. Веліченко, д-р хім. наук

Навчальне видання

Методичні вказівки

Методичні вказівки до практичних занять з дисципліни «Фізична та колоїдна хімія» за освітнім рівнем «Бакалвр» для студентів спеціальності «226 – Фармація»

Укладачі: ГИРЕНКО Дмитро Вадимович
ПРОЦЕНКО В'ячеслав Сергійович

Редактор
Коректор
Технічний редактор
Комп'ютерна верстка

Підписано до друку Формат 60×84/16. Папір ксерокс. Друк різнограф.
Умов. друк. арк. 0,6. Обл.-вид. арк. 0,67. Тираж 100 прим.
Зам. № 2. Свідоцтво ДК № 5026 від 16.12.2015.
ДВНЗ УДХТУ, 49005, Дніпро-5, просп. Гагаріна, 8.
Редакційно-видавничий відділ

ЗМІСТ

ВСТУП	4
План практичних занять	4
1. Практичне заняття № 1	5
1.1. Термохімія. Розрахунок теплового ефекту реакції.	5
1.2. Обчислення зміни ентропії.	7
2. Практичне заняття № 2	9
2.1. Хімічна рівновага.	9
3. Практичне заняття № 3	12
3.1. Фазова рівновага в однокомпонентних системах.	12
4. Практичне заняття № 4	16
4.1. Аналіз діаграм «рідина-пар»	16
5. Практичне заняття № 5	20
5.1. Електропровідність розчинів електролітів.	20
5.2. Гальванічний елемент.	21
6. Практичне заняття № 6	22
6.1. Формальна кінетика	22
6.2. Вплив температури на швидкість хімічної реакції.	23
6.3. Каталіз	24
7. Практичне заняття № 7	27
7.1. Поверхневі явища. Адсорбція.	27
8. Практичне заняття № 8	28
8.1. Властивості дисперсних систем.	28
9. Практичне заняття № 9	35
9.1. Будова міцел ліофобних золів. Коагуляція.	35
10. Список рекомендованої літератури	39

ВСТУП

Методичні вказівки призначені для проведення практичних занять з дисципліни «Фізична та колоїдна хімія» для студентів спеціальності 226 – Фармація. Методичні вказівки містять план практичних занять, а також прикладі розв'язання типових розрахункових задач.

План практичних занять

№	Зміст практичних занять
	7-й семестр
ПЗ 1	Перше начало термодинаміки. Обчислення роботи в ізобарному, ізотермічному і адіабатичному процесах. Обчислення теплових ефектів хімічних реакцій та фазових перетворень на основі таблиць стандартних термодинамічних величин. Залежність теплового ефекту хімічних реакцій від температури. Рівняння Кірхгофа. Друге начало термодинаміки. Зміна ентропії індивідуальних речовин у різних процесах, при фазових перетвореннях і при змішуванні ідеальних газів.
ПЗ 2	Обчислення хімічної спорідненості реагуючих речовин за рівнянням ізотерми хімічної реакції. Обчислення констант рівноваги за рівнянням ізобари хімічної реакції. Хімічна рівновага в гетерогенних системах. Методи обчислення константи хімічної рівноваги. Залежність константи рівноваги від температури.
ПЗ 3	Ідеальні та розведені розчини. Закони Рауля та Генрі. Обчислення молекулярної маси і ступеню дисоціації нелетких речовин у розведених розчинах. Кріоскопія та ебуліоскопія. Розрахунок молекулярної маси речовини за даними ебуліоскопічних та кріоскопічних вимірювань.
	8-й семестр
ПЗ 4	Аналіз діаграм стану "рідина - тверда речовина" та "рідина - пара".
ПЗ 5	Визначення питомої та еквівалентної електропровідності розчинів. Закон розведення Оствальда. Іонна сила розчинів. Активність компонентів розчинів електроліту. Визначення електродних потенціалів. Визначення ЕРС гальванічного елемента та інші аспекти його термодинаміки.
ПЗ 6	Методи визначення порядку реакції. Закон діючих мас. Кінетичні рівняння реакцій різних порядків. Вплив температури на швидкість реакції. Правило Вант-Гоффа та рівняння Арреніуса.
	9-й семестр
ПЗ 7	Дисперсні системи. Поверхневі явища. Поверхневий натяг.
ПЗ 8	Розрахунок питомої поверхні, дисперсності дисперсної фази. Рівняння Ейнштейна-Смолуховського. Коефіцієнт дифузії. Швидкість седиментації. Гіпсометричний закон Лапласа.
ПЗ 9	Будова міцели ліофобного золю. Швидкість електрофорезу та електроосмосу. Порог коагуляції. Кінетика коагуляції.

1. Практичне заняття № 1.

1.1. Термохімія. Розрахунок теплового ефекту реакції.

Багатоваріантна задача 1.1.

Для заданої хімічної реакції, яка перебігає в газовій фазі:

1. Розрахуйте стандартний тепловий ефект хімічної реакції (ΔH^0_{298});
2. Знайти зміну коефіцієнтів **a**, **b**, **c**, **c'** для заданої реакції (Δa , Δb , Δc , $\Delta c'$);
3. Записати аналітичну залежність теплового ефекту реакції від температури $\Delta H = f(T)$;
4. Розрахуйте тепловий ефект при заданій температурі T;
5. Встановіть, як відрізняється теплові ефекти при сталому тиску та об'єму.

№	Реакція	T, K	№	Реакція	T, K
1	$\text{CH}_4 + 3\text{Cl}_2 = \text{CHCl}_3 + 3\text{HCl}$	800	11	$\text{CHCl}_3 + 2\text{HCl} = \text{CH}_3\text{Cl} + 2\text{Cl}_2$	500
2	$\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 = \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$	1000	12	$\text{CH}_4 + \text{Cl}_2 = \text{CH}_3\text{Cl} + \text{HCl}$	600
3	$4\text{NH}_3 + 3\text{O}_2 = 2\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$	600	13	$\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} = \text{CO}_2 + 4\text{H}_2$	700
4	$\text{CH}_4 + \text{CO}_2 = 2\text{CO} + 2\text{H}_2$	700	14	$4\text{NH}_3 + 5\text{O}_2 = 4\text{NO} + 6\text{H}_2\text{O}$	800
5	$4\text{HCl} + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{Cl}_2$	900	15	$2\text{NO} + \text{Cl}_2 = 2\text{NOCl}$	900
6	$2\text{H}_2\text{O} + 2\text{Cl}_2 = 4\text{HCl} + \text{O}_2$	1000	16	$2\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3 = \text{m-C}_6\text{H}_4(\text{CH}_3)_2 + \text{C}_6\text{H}_6$	1000
7	$2\text{Cl}_2 + 2\text{H}_2\text{O} = 4\text{HCl} + \text{O}_2$	1300	17	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} + 3\text{O}_2 = 2\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$	500
8	$2\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} = (\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}$	1000	18	$2\text{C}_3\text{H}_6 + 9\text{O}_2 = 6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$	700
9	$\text{CO}_2 + 3\text{H}_2 = \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$	1200	19	$\text{CH}_4 + 2\text{Cl}_2 = \text{CH}_2\text{Cl}_2 + 2\text{HCl}$	1100
10	$2\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} = (\text{CH}_3)_2\text{CO} + 3\text{H}_2 + \text{CO}$	500	20	$\text{CO} + 3\text{H}_2 = \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$	900

Приклад розв'язування задачі

Дана реакція: $4\text{CO} + 2\text{SO}_2 = \text{S}_2 + 4\text{CO}_2$

Заносимо в таблицю термодинамічні дані для учасників реакції

[МВ №3626 або Краткий справочник физико-химических величин / Под ред. Мищенко К.С., Равделя А.А. – Л.: Химия, 1983. – 231 с]:

Речовина	$\Delta H^0_{f,298,i}$, кДж/моль	$C_p^0 = f(T)$, Дж/(моль · К)				Температурний інтервал, К
		<i>a</i>	<i>b</i> · 10 ³	<i>c</i> · 10 ⁶	<i>c'</i> · 10 ⁻⁵	
CO ₂	-393,51	44,14	9,04	-	-8,54	298 – 2000
S ₂	128,37	36,11	1,09	-	-3,51	298 – 2000
SO ₂	-296,9	46,19	7,87	-	-7,70	298 – 2500
CO	-110,53	28,41	4,10	-	-0,46	298 – 2500

1. Визначаємо ізобарний тепловий ефект реакції при стандартних умовах, беручи до уваги слідство із закону Гесса:

$$\Delta H_{298}^0 = (4 \cdot \Delta H_{f,298}^0(\text{CO}_2) + \Delta H_{f,298}^0(\text{S}_2)) - (4 \cdot \Delta H_{f,298}^0(\text{CO}) + 2 \cdot \Delta H_{f,298}^0(\text{SO}_2)) = (4 \cdot (-393,51) + 128,37) - (4 \cdot (-110,53) + 2 \cdot (-296,9)) = -409,75 \text{ кДж.}$$

2. Розраховуємо зміну емпіричних коефіцієнтів багаточленів $C_p^0 = f(T)$ для продуктів реакції та вихідних речовин. За їх значенням розраховуємо коефіцієнти в рівнянні $\Delta C_p^0 = f(T)$.

$$\Delta a = (4 \cdot a(\text{CO}_2) + a(\text{S}_2)) - (4 \cdot a(\text{CO}) + 2 \cdot a(\text{SO}_2)) = (4 \cdot 44,14 + 36,11) - (4 \cdot 28,41 + 2 \cdot 46,19) = 6,65$$

$$\Delta b = (4 \cdot b(\text{CO}_2) + b(\text{S}_2)) - (4 \cdot b(\text{CO}) + 2 \cdot b(\text{SO}_2)) = 5,11 \cdot 10^{-3}$$

$$\Delta c = (4 \cdot c(\text{CO}_2) + c(\text{S}_2)) - (4 \cdot c(\text{CO}) + 2 \cdot c(\text{SO}_2)) = 0$$

$$\Delta c' = (4 \cdot c'(\text{CO}_2) + c'(\text{S}_2)) - (4 \cdot c'(\text{CO}) + 2 \cdot c'(\text{SO}_2)) = -20,43 \cdot 10^5$$

Інтервал температур, в якому справедливі розраховані коефіцієнти, визначаємо за найменшим з усіх температурних інтервалів для реагуючих речовин.

Тоді, для даної реакції в інтервалі температур 298 – 2000 К отримаємо:

$$\Delta C_p^0 = 6,65 + 5,11 \cdot 10^{-3} \cdot T - 20,43 \cdot 10^5 / T^2$$

3. Залежність $\Delta H_T^0 = f(T)$ визначається за законом Кирхгоффа:

$$\left(\frac{d\Delta H^0}{dT}\right) = \Delta C_p^0$$

$$\Delta C_p^0 = \sum n_i C_{p, \text{прод}}^0 - \sum n_i C_{p, \text{вих}}^0 = \Delta a + \Delta b \cdot T + \Delta c \cdot T^2 + \frac{\Delta c'}{T^2}$$

$$\Delta H_T^0 = \Delta H_{298}^0 + \int_{298}^T \Delta C_p^0 dT = \Delta H_{298}^0 + \Delta a \cdot (T - 298) + \frac{\Delta b}{2} \cdot (T^2 - 298^2) + \frac{\Delta c}{3} \cdot (T^3 - 298^3) - \Delta c' \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298}\right)$$

Підставивши в попереднє рівняння значення ізобарного теплового ефекту при стандартних умовах ΔH_{298}^0 та коефіцієнтів Δa , Δb , Δc та $\Delta c'$, отримаємо аналітичну залежність $\Delta H_T^0 = f(T)$ для даної реакції:

$$\Delta H_T^0 = -409750 + 6,65 \cdot (T - 298) + \frac{5,11 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot (T^2 - 298^2) + 20,43 \cdot 10^5 \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{298}\right)$$

4. Підставивши $T = 700 \text{ К}$, визначаємо тепловий ефект реакції ΔH_{700}^0 :

$$\Delta H_{700}^0 = -409750 + 6,65 \cdot (700 - 298) + \frac{5,11 \cdot 10^{-3}}{2} \cdot (700^2 - 298^2) + 20,43 \cdot 10^5 \cdot \left(\frac{1}{700} - \frac{1}{298}\right) = -409999 \text{ Дж}$$

5. Тепловий ефект при постійному тиску дорівнює: $\Delta H = \Delta U + P\Delta V$, а для ідеальних газів:

$$\Delta H = \Delta U + \Delta nRT,$$

де Δn – зміна кількості молів газоподібних речовин під час проходження реакції.

Тоді, різниця теплових ефектів хімічної реакції в ізобарному та ізохорному процесах визначається наступним чином:

$$\Delta H - \Delta U = \Delta nRT.$$

Визначаємо Δn для заданої реакції $4\text{CO} + 2\text{SO}_2 = \text{S}_2 + 4\text{CO}_2$ з урахуванням того, що всі речовини – гази: $\Delta n = (1 + 4) - (4 + 2) = -1$, тоді

$$\Delta H - \Delta U = -1 \text{ моль } 8,314 \text{ Дж/мольК } 700 \text{ К} = -5819,8 \text{ Дж.}$$

1.2. Обчислення зміни ентропії.

Багатоваріантна задача 1.2.

Обчисліть зміну ентропії при нагріванні (охлажденні) 4 кг речовини А від T_1 до T_2 , якщо відомі температури його плавлення та кипіння, теплоємності в рідкому, твердому та газоподібному стані, теплоти плавлення й випаровування.

№	Речовина	Формула	T_1 °С	T_2 °С	$T_{пл}$ °С	$T_{кип}$ °С	$\Delta H_{пл}$, кДж моль	$\Delta H_{вип}$, кДж моль	Теплоємність, кДж/кг·К		
									$C_p^{тв}$	$C_p^ж$	$C_p^г$
1	Бензол	C_6H_6	-10	100	5,5	80,1	9,95	30,76	1,468	1,734	1,422
2	Толуол	$C_6H_5CH_3$	-100	120	-95	110,6	6,62	37,99	0,921	1,69	1,281
3	Бензиловий спирт	$C_6H_5CH_2OH$	-15,3	215	-15,3	204,7	8,97	50,48	–	2,014	1,36
4	Плюмбум(II) хлорид	$PbCl_2$	400	1000	495	953	23,85	128,9	0,277	0,375	0,199
5	1,4-діоксан	$C_4H_8O_2$	11,8	120	11,8	101,3	12,85	35,77	–	1,735	1,25
6	Етилацетат	$CH_3COOC_2H_5$	-83,6	90	-83,6	77,2	10,48	32,26	–	1,928	1,3
7	Діетиловий етер	$C_2H_5OC_2H_5$	-120	50	-116,3	34,6	7,537	26,6	1,256	2,321	1,934
8	Бутанол	C_4H_9OH	-79,9	150	-79,9	117,5	9,28	52,3	–	2,435	1,6
9	Піридин	C_5H_5N	-50	130	-41,8	115,3	–	35,54	0,8	1,714	1,4
10	Бром	Br_2	-20	79	-7,1	59,2	10,551	20,733	0,674	0,461	0,225
11	Вода	H_2O	-20	100	0	100	6,009	40,66	0,570	4,187	1,919
12	Ртуть	Hg	-40	360	-38,89	356,66	2,30	59,23	0,141	0,139	0,104
13	Трихлор-метан	$CHCl_3$	-63,5	90	-63,5	61,3	9,211	31,42	–	0,963	0,545
14	Етанол	C_2H_5OH	-15,6	115	-15,6	78,5	5,02	42,30	–	2,453	1,399
15	Ацетон	CH_3OCH_3	-100	70	-95,35	56,24	5,69	29,67	2,261	2,177	1,129
16	n-Пентан	$C_5H_{11}OH$	-129,7	50	-129,7	36,074	8,42	26,43	–	1,666	1,2
17	Циклогексан	C_6H_{12}	6,554	81,40	6,554	81,40	2,63	33,03	–	1,810	–
18	Мурашина кислота	$HCOOH$	0	130	8,2	100,7	12,687	23,112	1,620	2,135	1,058
19	o-Ксилол	$C_6H_5(CH_3)_2$	-25,17	160	-25,17	144,41	11,282	367,3	–	1,717	1,891
20	Фосген	$COCl_2$	-118	25	-118	8,3	5,74	24,39	–	1,024	0,988

Приклад розв'язування задачі

Речовина: CH_3OH ; $g = 25$ кг.;

$T_1 = 175,3$ К; $T_2 = 400$ К;

$T_{пл} = 175,3$ К; $\Delta H_{пл} = 3,17 \cdot 10^3$ Дж/моль;

$T_{кип} = 337,9$ К; $\Delta H_{вип} = 35,296 \cdot 10^3$ Дж/моль;

$C_p^{рід} = 2,512 \cdot 10^3$ Дж/кг·К; $C_p^{газ} = 1,371 \cdot 10^3$ Дж/кг·К.

1. Змінення ентропії 25 кг CH_3OH при нагріві від $T_1 = 175,3$ К до $T_2 = 400$ К дорівнює сумі ΔS для кількох стадій:

I - плавлення CH_3OH при $T_{пл} = 175,3$ К ΔS_1 ,

II - нагрів $CH_3OH_{(рід)}$ від $T_{пл} = 175,3$ К до $T_{кип} = 337,9$ К ΔS_2 ,

III - кипіння CH_3OH при $T_{\text{кип}} = 337,9 \text{ К}$ ΔS_3 ,

IV - нагрів $\text{CH}_3\text{OH}_{(г)}$ від $T_{\text{кип}} = 337,9 \text{ К}$ до $T_2 = 400 \text{ К}$ ΔS_4 .

Сумарна зміна ентропії буде складати: $\Delta S_{\Sigma} = \Delta S_1 + \Delta S_2 + \Delta S_3 + \Delta S_4$,

де ΔS_2 , ΔS_4 – зміна ентропії при нагріві рідкого та газоподібного CH_3OH відповідно;

ΔS_1 , ΔS_3 – зміна ентропії при плавленні та кипінні.

$$\text{Знаходимо кількість речовини } n = \frac{g}{M} = \frac{25000 \text{ г}}{32 \frac{\text{г}}{\text{моль}}} = 781,25 \text{ моль}.$$

$$\Delta S_1 = n \frac{\Delta H_{\text{пл}}}{T_{\text{пл}}} = 781,25 \cdot \frac{3,17 \cdot 10^3}{175,3} = 14127,56 \text{ Дж/К};$$

$$\Delta S_3 = n \frac{\Delta H_{\text{вип}}}{T_{\text{кип}}} = 781,25 \cdot \frac{35,296 \cdot 10^3}{337,9} = 81611,6 \text{ Дж/К};$$

$$\Delta S_2 = g \cdot C_p^{\text{рід}} \cdot \ln \frac{T_{\text{кип}}}{T_{\text{пл}}} = 25 \cdot 2,512 \cdot 10^3 \cdot \ln \frac{337,9}{175,3} = 41320 \text{ Дж/К};$$

$$\Delta S_4 = g \cdot C_p^{\text{газ}} \cdot \ln \frac{T_2}{T_{\text{кип}}} = 25 \cdot 1,371 \cdot 10^3 \cdot \ln \frac{400}{337,9} = 5782,7 \text{ Дж/К};$$

$$\Delta S_{\Sigma} = 14127,56 + 81611,6 + 41320 + 5782,7 = 142841,86 \text{ Дж/К}.$$

2. Зміна ентальпії при випаровуванні 50 молей метанолу дорівнює:

$$\Delta H = n \Delta H_{\text{вип}} = 50 \cdot 35,296 \cdot 10^3 = 1764800 \text{ Дж} = 1764,8 \text{ кДж}.$$

Зміну енергії Гіббса розраховують за формулою:

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S = n \Delta H_{\text{кип}} - T_{\text{кип}} \frac{n \Delta H_{\text{кип}}}{T_{\text{кип}}} = 50 \cdot 35,296 \cdot 10^3 - 337,9 \cdot \frac{50 \cdot 35,296 \cdot 10^3}{337,9} = 0.$$

Для процесу випаровування, що відбувається за сталих тиску і температури, зміну енергії Гельмгольца можна розрахувати таким чином:

$$\Delta A = \Delta G - nRT = 0 - 50 \cdot 8,31 \cdot 337,9 = -140397,5 \text{ Дж}.$$

Робота розширення в ізобарно-ізотермічних умовах

$$W = nRT = 140397,5 \text{ Дж}.$$

За цих умов зміна внутрішньої енергії пов'язана зі зміною ентальпії рівнянням

$$\Delta H = \Delta U + nRT, \text{ звідки знаходимо:}$$

$$\Delta U = \Delta H - nRT = 1764800 - 50 \cdot 8,31 \cdot 337,9 = 1624402,6 \text{ Дж}.$$

2. Практичне заняття № 2

2.1. Хімічна рівновага.

Багатоваріантна задача 2.1.

Газоподібні речовини А і В реагують за наведеним рівнянням з утворенням газоподібної речовини С.

1. Запишіть константи рівноваги K_p і K_c реакції через рівноважну кількість речовини С, яка дорівнює x , якщо вихідні речовини взято в стехіометричних кількостях, рівноважний тиск в системі складає P .

2. Розрахуйте величини K_p і K_c за $T=500\text{ K}$, якщо $P = 10^5\text{ Па}$, а $x = 0,25$.

Варіант	Реакція	Варіант	Реакція
1	$A + B = 1/2C$	11	$2A + 1/2 B = 3C$
2	$1/2A + B = 2C$	12	$2A + 3B = 2C$
3	$3A + B = C$	13	$3A + 1/2 B = 3C$
4	$2A + 3B = 3C$	14	$3A + 1/2 B = 2C$
5	$2A + 1/2 B = 2C$	15	$1/2A + 1/2B = 2C$
6	$3A + 1/2 B = C$	16	$1/2A + 1/2B = 3C$
7	$A + 2B = C$	17	$A + 3B = 3C$
8	$A + B = 3C$	18	$3A + B = C$
9	$1/2A + B = 2C$	19	$A + 2B = 2C$
10	$1/2 A + B = 3C$	20	$A + 2B = 4C$

Приклад розв'язування задачі

Дана реакція: $3A + B = 3C$

За умовами задачі речовини А та В взяли у стехіометричних кількостях, тобто $n_{0A} = 3$ моль і $n_{0B} = 1$ моль. Виражаємо рівноважні кількості А та В, прийняв, що рівноважна кількість речовини С дорівнює x .



До початку реакції: 3 1 -

В момент рівноваги: 3-x $1 - \frac{1}{3} \cdot x$ x

Запишемо константу рівноваги K_n для заданої реакції: $K_n = \frac{\bar{n}_C^3}{\bar{n}_A^3 \cdot \bar{n}_B}$

де \bar{n}_i - рівноважна кількість речовин.

Тоді:

$$K_n = \frac{x^3}{(3-x)^3 \cdot (1 - \frac{1}{3} \cdot x)}$$

K_n пов'язана з K_p і K_c наступним співвідношенням:

$$K_p = K_n \cdot \left(\frac{P}{\sum n}\right)^{\Delta n}; \quad K_p = K_c(RT)^{\Delta n};$$

Кількість речовини в рівноважній суміші складає:

$$\sum n = 3 - x + 1 - \frac{1}{3} \cdot x + x = 4 - \frac{1}{3}x,$$

$$\Delta n = 3 - (3 + 1) = -1 \text{ моль.}$$

Оскільки $\Delta n = -1$ моль, то запишемо K_p , через рівноважну кількість речовини С (x) та рівноважний тиск P:

$$K_p = \frac{x^3}{(3-x)^3 \cdot (1-\frac{1}{3} \cdot x)} \cdot \left(\frac{P}{4-\frac{1}{3}x} \right)^{-1}$$

Багатоваріантна задача 2.2.

Хімічна реакція $A = B + C$ перебігає в газовій фазі за температури T.

1. Виразити склад рівноважної газової суміші, якщо вихідні речовини реагують у стехіометричних кількостях, а рівноважна кількість одного із продуктів дорівнює x;
2. Розрахувати склад рівноважної суміші та вихід продукту (ВП), якщо рівноважний тиск в системі P, а константа рівноваги за температури T дорівнює K_p .
3. Розрахувати константу рівноваги K_c .

№	T, К	P, Па	K_p	№	T, К	P, Па	K_p
1	500	100	10	16	500	400	900
2	550	120	50	17	550	420	950
3	600	140	100	18	600	440	1000
4	650	160	150	19	650	460	10
5	700	180	200	20	700	480	50
6	750	200	250	21	750	500	100
7	800	220	300	22	800	100	150
8	850	240	350	23	850	120	200
9	900	260	400	24	900	140	250
10	950	280	450	25	950	160	300
11	1000	300	500	26	1000	180	350
12	1050	320	550	27	1050	200	400
13	1100	340	600	28	1100	220	450
14	1150	360	700	29	1150	240	500
15	1200	380	800	30	1200	260	550

Приклад розв'язування задачі

Виразимо склад рівноважної газової суміші для заданої реакції через рівноважну кількість бутена, яку позначимо через x.



До реакції: 1 - -

Під час рівноваги: 1-x x x

Знайдемо сумарну кількість газоподібних речовин в рівноважній суміші:

$$\Sigma n = 1-x+x+x = 1+x$$

Застосуємо закон Дальтона, і виразимо парціальні тиски газоподібних учасників реакції, враховуючи, що тиск в системі дорівнює P.

Закон Дальтона: парціальний тиск газу в газовій суміші дорівнює добутку його мольної частки на загальний тиск ($P_i = \frac{n_i}{\Sigma n} P$)

$$P(A) = \frac{1-x}{1+x} P, \quad P(B) = \frac{x}{1+x} P, \quad P(C) = \frac{x}{1+x} P$$

Запишемо вираз константи швидкості, вираженої через рівноважні тиску газоподібних речовин K_p :

$$K_p = \frac{P(B) \cdot P(C)}{P(A)}$$

Підставимо вирази для парціальних тисків газів у вираз для константи рівноваги і спростимо:

$$K_p = \frac{xx(1+x)P^2}{(1+x)(1+x)(1-x)P} = \frac{x^2 P}{1-x^2}$$

Підставимо в отриманий вираз задані в умові завдання величини K_p , $P=10^3$ Па і знайдемо рівноважну кількість В:

$$\frac{x^2 \cdot 10^3}{1-x^2} = 6,1$$

Вирішимо рівняння і знайдемо x .

$$x^2 \cdot 10^3 = 6,1 \cdot (1-x^2)$$

$$x^2 \cdot 10^3 - 6,1 \cdot x^2 = 6,1$$

$$993,9 \cdot x^2 = 6,1$$

$$x^2 = \frac{6,1}{993,9} = 6,14 \cdot 10^{-3}$$

$$x = \sqrt{6,14 \cdot 10^{-3}} = 0,078 \text{ моль}$$

Таким чином, склад рівноважної газової суміші буде таким:

$$A \quad = \quad B \quad + \quad C$$

Під час рівноваги:

$$1-x \quad \quad \quad x \quad \quad \quad x$$

$$0,922 \text{ моль} \quad 0,078 \text{ моль} \quad 0,078 \text{ моль}$$

Розрахуємо вихід речовини (В):

$$ВП(B) = \frac{x}{\Sigma x} \cdot 100\% = \frac{0,078}{1+0,078} \cdot 100\% = 7,24\%$$

3. Практичне заняття № 3

3.1. Фазова рівновага в однокомпонентних системах.

Багатоваріантна задача 3.1.

Задана рідина кипить при стандартних умовах ($P_1=101325\text{Па}$) при температурі T_1 . За тиску P_2 рідина кипить при температурі T_2 . С допомогою рівняння Клапейрона-Клаузіуса для двох температур:

1. Розрахувати молярну та питому теплоту випаровування рідини;
2. Розрахувати температуру кипіння рідини за тиску P_3 ;
3. Розрахувати тиск (P_4), при якому температура кипіння зростає на 20°C відносно T_1 .
4. Яку кількість теплоти треба надати 500 г. рідини, щоб перетворити її в пар? Вважати, що рідина знаходиться при температурі кипіння.

Вар.	Рідина	Формула	$T_1, ^\circ\text{C}$	$T_2, ^\circ\text{C}$	$P_2, \text{Па}$	$P_3, \text{Па}$
1	н-Пентан	C_5H_{12}	36,1	41,3	120000	224000
2	Піридин	$\text{C}_5\text{H}_5\text{N}$	115,3	124,3	130000	125000
3	Пропанол	$\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$	97,2	104,1	135000	132000
4	Тетрахлорметан	CCl_4	76,54	87,8	140000	145000
5	Толуол	$\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$	110,6	122,5	145000	150000
6	Трихлорметан	CHCl_3	61,3	73,3	150000	125000
7	Трихлороцтова кислота	CCl_3COOH	195	209,2	155000	205000
8	Оцтова кислота	CH_3COOH	118,1	129,9	125000	125000
9	Фосген	COCl_2	8,3	21,2	160000	165000
10	Хлорбензол	$\text{C}_6\text{H}_5\text{Cl}$	131,7	151,2	165000	160000
11	Циклогексан	C_6H_{12}	81,4	98,6	170000	170000
12	Циклопентан	C_5H_{10}	49,3	76,6	224000	175000
13	Етанол	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$	78,3	90,3	180000	140000
14	Етилацетат	$\text{CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5$	77,2	97,3	185000	145000
15	Етиленгліколь	$\text{ONC}_2\text{H}_4\text{OH}$	197,3	216,2	190000	150000

Приклад розв'язування задачі.

Дано: Рідина – Бром (Br_2); $T_1 = 59,2$; $T_2 = 77,5$; $P_2 = 150000 \text{ Па}$; $P_3 = 200000 \text{ Па}$

Для розв'язання задачі скористуємось рівнянням Клапейрона-Клаузіуса в інтегральному вигляді:

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

1. Розрахуємо молярну теплоту випаровування (кипіння) рідини:

$$\Delta H_{\text{исп}} = \frac{R \cdot T_2 \cdot T_1}{T_2 - T_1} \ln \frac{P_2}{P_1},$$

Перерахуємо значення температур до абсолютної шкали:

$$T_1 = 59,2 + 273 = 332,2\text{K}; T_2 = 77,5 + 273 = 350,5\text{K}$$

$$\Delta H_{\text{исп}} = \frac{8,314 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \cdot 332,2\text{K} \cdot 350,5\text{K}}{350,5\text{K} - 332,2\text{K}} \ln \frac{150000}{101325} = 20,7 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$$

Знайдемо питому теплоту випаровування брому, для цього спочатку розрахуємо його молекулярну масу $M(\text{Br}_2) = 160 \text{ г/моль} = 0,16 \text{ кг/моль}$:

$$\Delta H_{\text{уд}} = \frac{\Delta H_{\text{мол}}}{M} = \frac{20,7 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}}{0,16 \frac{\text{кг}}{\text{моль}}} = 129,37 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

2. Розрахуємо температуру кипіння брому (T_3) за тиску P_3 .

$$\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_3} = \frac{R}{\Delta H_{\text{исп}}} \ln \frac{P_3}{P_1}; \frac{1}{T_3} = \frac{1}{T_1} - \frac{R}{\Delta H_{\text{исп}}} \ln \frac{P_3}{P_1}$$

$$\frac{1}{T_3} = \frac{1}{332,2\text{K}} - \frac{8,314 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}}{20700 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}}} \ln \frac{200000 \text{ Па}}{101325 \text{ Па}} = 2,74 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{K}}$$

$$T_3 = \frac{1}{2,74 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}} = 365,3\text{K}$$

3. Розрахуємо тиск (P_4) за якого температура кипіння брому буде дорівнювати $T_4 = T_1 + 20\text{K} = 332,2\text{K} + 20\text{K} = 352,2\text{K}$:

$$\ln P_4 = \ln P_1 + \frac{\Delta H_{\text{исп}}}{R} \left(\frac{T_4 - T_1}{T_4 \cdot T_1} \right)$$

$$\ln P_4 = \ln 101325 \text{ Па} + \frac{20700 \frac{\text{Дж}}{\text{моль}}}{8,314 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}} \left(\frac{352,2\text{K} - 332,2\text{K}}{352,2\text{K} \cdot 332,2\text{K}} \right) = 11,95$$

Коли тиск становитиме $P_4 = e^{11,95} = 154817 \text{ Па}$ бром буде кипіти при $352,2\text{K}$.

4. Для того, щоб перевести $0,1 \text{ кг}$ брому в пару при температурі кипіння необхідно надати тепла:

$$Q = \Delta H_{\text{пит}} \cdot m = 129,37 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \cdot 0,1 \text{ кг} = 12,94 \text{ кДж}$$

3.2. Властивості розчинів

Багатоваріантна задача 3.2.

При температурі T тиск пари розчину концентрації ω , мас. % невідомої нелеткої речовини у рідкому розчиннику дорівнює P_1 , Па; густина цього розчину d , криоскопічна стала K .

1. Обчислити молярну масу розчиненої речовини.
2. Визначити молярну і моляльну концентрації розчину.

3. Обчислити осмотичний тиск розчину.
4. Обчислити величину криоскопічного ефекту розчину.

№	ω_2 , мас. %	M_1 , г/моль	$P_{0,1}$, Па	P_1 , Па	T, К	$d \cdot 10^{-3}$, кг/м ³	K , $\frac{кг \cdot К}{моль}$
1	15	18	1400	1310	288	1	0,512
2	10	27	40290	38414	278	0,75	0,255
3	11	28	31993	30000	69	0,85	0,420
4	9	30	34738	32841	114	1,3	0,382
5	12	32	16396	15108	307	1,59	0,185
6	10	34	52697	49000	208	1,985	0,481
7	9	44	740942	694000	228	1,5	0,325
8	8	46	2569	2375	283	1,21	0,185
9	9	52	96942	91110	253	2,9	0,222
10	4	254	16975	15200	398	3,97	0,551
11	8	58	36637	33896	302	3,56	0,325
12	9	64	7570	7028	214	1,59	0,205
13	8	68	12663	11600	149	1,78	0,286
14	7	78	6000	5600	283	0,75	0,510
15	6	81	51987	48430	194	1,21	0,460

Приклад розв'язування задачі.

Умови задачі. При температурі 1991 К тиск насиченої пари над розчинником складає $P_{0,1}=720$ Па, а над 10 ваг.% розчином невідомої речовини складає $P_1 = 676$ Па. Густина розчину 680 кг/м³. криоскопічна стала $K=0,355 \frac{кг \cdot К}{моль}$.

Розрахуємо молекулярну масу розчиненої невідомої речовини. Для цього знайдемо мольну частку розчинника в розчині (x_1) за законом Рауля:

$$x_1 = \frac{P_1}{P_{0,1}} = \frac{676 \text{ Па}}{720 \text{ Па}} = 0,939$$

Мольна частка розчинника - це відношення кількості моль розчинника до сумарної кількості речовин в розчині:

$$x_1 = \frac{n_1}{n_1 + n_2} = \frac{g_1/M_1}{g_1/M_1 + g_2/M_2}$$

Так як концентрація розчину становить $\omega_2=15$ мас.%, то $g_2=15$ г, а $g_1=100-15=85$ г.

З урахуванням того, що молярна маса розчинника $M_1 = 52$ г / моль, розрахуємо молярну масу розчиненої речовини:

$$M_2 = \frac{x_1 \cdot g_2 \cdot M_1}{g_1 - g_1 \cdot x_1} = \frac{0,86 \cdot 15 \text{ г} \cdot 52 \text{ г/моль}}{85 \text{ г} - 85 \text{ г} \cdot 0,86} = 57 \text{ г/моль}$$

1. Розрахуємо моляльну і молярну концентрації розчину.

Моляльна концентрація - кількість речовини, розчиненої в 1 кг розчинника.

$$m_2 = \frac{n_2}{g_1} = \frac{\frac{g_2}{M_2}}{g_1} = \frac{15 \text{ г/моль}}{57 \text{ г/моль} \cdot 0,085 \text{ кг}} = 3,06 \text{ моль/кг}$$

Молярна концентрація - це кількість речовини, розчиненої в одному літрі або 1 м^3 (в системі СІ) розчина.

$$C_2 = \frac{n_2}{V_{\text{розчину}}} = \frac{\frac{g_2}{M_2}}{\frac{g_{\text{розчину}}}{\rho}} = \frac{15 \text{ г/моль}}{0,1 \text{ кг} \cdot \frac{680 \text{ кг/м}^3}}{57 \text{ г/моль}} = 1789 \text{ моль/м}^3$$

2. Розрахуємо осмотичний тиск цього розчину якщо $T_1 = 1991 \text{ К}$ за рівнянням Вант-Гоффа.

$$\pi = C_2 \cdot R \cdot T = 1789 \text{ моль/м}^3 \cdot 8,314 \text{ Дж/моль} \cdot \text{К} \cdot 1991 \text{ К} = 29613628 \text{ Па}.$$

3. Розрахуємо на скільки температура кристалізації розчину буде нижчою за температуру кристалізації чистого розчинника.

$$\Delta T_{\text{кр}} = K \cdot m_2 = 0,355 \frac{\text{К} \cdot \text{К}}{\text{моль}} \cdot 3,06 \frac{\text{моль}}{\text{кг}} = 1,086 \text{ К}$$

3.3 Типові задачі до теми «розчини неелектролітів»

1. Обчислити температуру замерзання водного розчину, що містить 2 г карбаміду ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) у 250 г води, якщо кріоскопічна стала води 1,86.

2. Обчислити температуру кипіння водного розчину, що містить 3 г цукрози ($\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$) у 200 г води, якщо ебуліоскопічна стала води 0,54.

3. Розрахувати молекулярну масу речовини X, якщо відомо, що водний розчин, що містить 60 г речовини X в 1000 мл розчину, чинить осмотичний тиск $4,31 \cdot 10^5 \text{ Па}$ при $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

4. Скільки грамів глюкози ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) необхідно розчинити у 200 г води, щоб знизити температуру замерзання на 0,15 К? Кріоскопічна стала води 1,86.

5. Обчислити температуру кипіння водного розчину, що містить 5 г карбаміду ($(\text{NH}_2)_2\text{CO}$) у 75 г H_2O , якщо ебуліоскопічна стала води дорівнює 0,52.

6. Тиск пари води при 298 К становить 2338,5 Па, а тиск пари водного розчину при тій же температурі 2295,8 Па. Визначити моляльність цього розчину.

7. Молярна частка деякої нелеткої речовини у водному розчині дорівнює 0,07. Визначити тиск пари над розчином при 298К, якщо тиск насиченої пари над чистою водою дорівнює $3,217 \cdot 10^3 \text{ Па}$.

4. Практичне заняття № 4

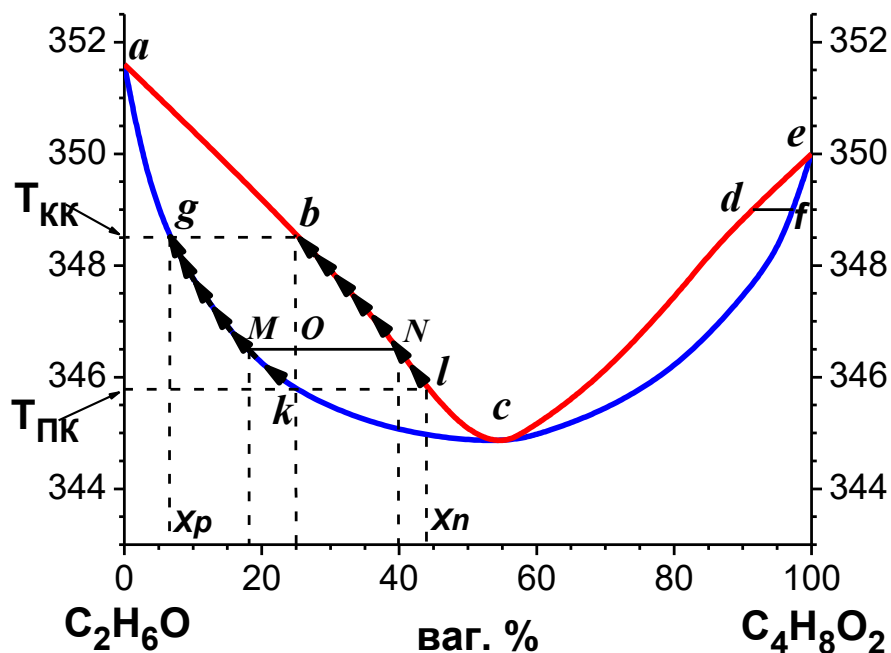
4.1. Аналіз діаграм «рідина-пар».

Пояснення до діаграми стану температура кипіння – склад

Розглянемо діаграму кипіння системи $C_4H_8O_2$ (етилацетат) – C_2H_6O (етанол).

Крива *abcde* є кривою складу насиченої пари. Вище кривої насиченої пари система гомогенна, фаза одна – пара. Крива *agcfe* є кривою складу рідини, що кипить. Нижче кривої рідини система гомогенна, фаза одна – рідина. Між кривими насиченої пари *abcde* і рідини *agcfe* система гетерогенна – двофазна. В рівновазі знаходяться рідина і насичена пара.

Склад пари визначається по кривій пари *abcde*, склад рідкої фази визначається по кривій рідини *agcfe*.



Для визначення складів рівноважних фаз через точку заданого стану (або для зазначеної температури) проводиться ізотерма. Точка перетину ізотерми з кривою рідини *agcfe* характеризує склад рідкої фази, який визначається по осі абсцис. Точка перетину ізотерми з кривою насиченої пари *abcde* дає склад пари.

Наприклад, необхідно визначити склад пари, який знаходиться в рівновазі з рідиною, що кипить при температурі 348,5 К.

Проводимо ізотерму при зазначеній температурі. Абсциса точки перетину ізотерми з кривою рідини *g* показує склад рідини, що кипить - x_p (6,0 ваг.% $C_4H_8O_2$. 94,0 ваг.% C_2H_6O). В рівновазі з цією рідиною буде насичена пара, склад якої визначається абсцисою точки *b* – точки перетину ізотерми з кривою насиченої пари. Склад пари x_n – 25,0 ваг.% $C_4H_8O_2$ та 75,0 ваг.% C_2H_6O .

В системі $C_4H_8O_2$ – C_2H_6O існує ще одна рідина, що кипить при температурі 348,5 К. Склад її визначається точкою *f* (96 ваг.% $C_4H_8O_2$).

Склад пари, що знаходиться в рівновазі з цією рідиною характеризується точкою *d* (87 ваг.% $C_4H_8O_2$).

На діаграмі точка *c* визначає склад азеотропної суміші (55 ваг.% $C_4H_8O_2$). Ця точка характеризується однаковим складом рідкої фази і пари

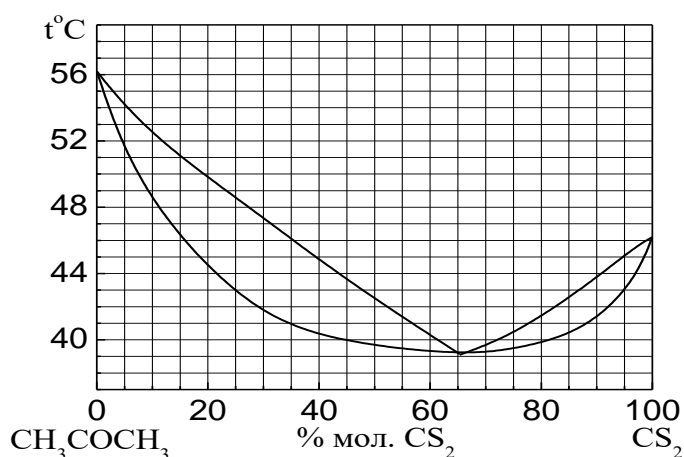
Проаналізуємо процес нагрівання бінарної рідкої системи. По кривій рідини *agcfe* визначається температура початку кипіння суміші (або температура кінця конденсації). По кривій насиченої пари *abcde* визначається температура кінця кипіння рідини (або температура початку конденсації).

Система, що містить 25 ваг.% $C_4H_8O_2$, закипить (тобто стає двофазною) при температурі, яка визначається ординатою точки *k* ($T_{ПК} = 345,6$ К). При цій температурі визначаємо склад пари (першої бульбашки пари). Для цього проводимо ізотерму ($T = 345,6$ К) до перетину з кривою насиченої пари. Абсциса точки *l* показує склад пари ($x_{II} = 45$ ваг.% $C_4H_8O_2$). Пара має вміст етилацетату $C_4H_8O_2$ більший, ніж рідина, тобто у парі переважно переходить цей компонент, тому при кипінні рідка фаза збіднюється на етилацетат і її склад змінюється. Разом зі зміною складу рідкої фази змінюється і температура кипіння системи. Зміна складу рідкої фази веде до зміни складу насиченої пари, що знаходиться у рівновазі з рідиною. Зміна складу пари показана стрілками на кривій *bl*. Зміна складу рідкої фази показана стрілками на кривій *gk*.

Температуру кінця кипіння показує ордината точки *b* ($T_{КК} = 348,5$ К). При цій температурі зникає остання крапля рідини. Її склад визначаємо по абсцисі точки *g* – точки перетину кривої рідини з ізотермою $T = 348,5$ К ($x_P = 6,0$ ваг.% $C_4H_8O_2$).

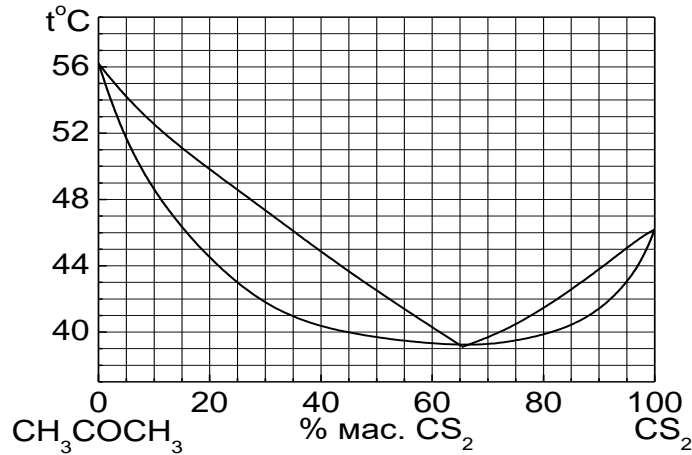
При температурі вище 348,5 К система стає гомогенною (пара). Склад пари дорівнює складу вихідної рідини і при подальшому нагріванні не змінюється.

Задача 4.1.



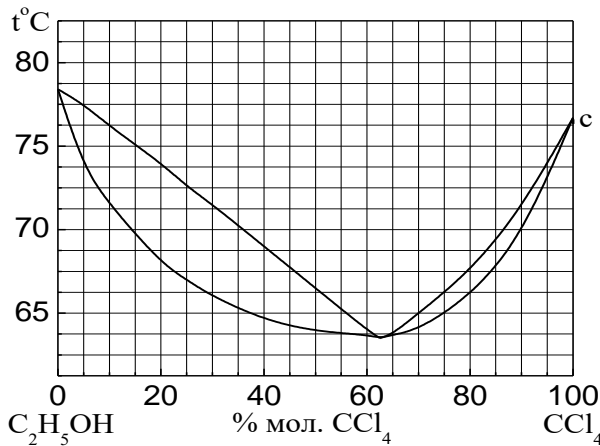
Використовуючи діаграму, зображену на малюнку, визначте склад азеотропної суміші і температуру її кипіння. При якій температурі почне кипіти розчин, що містить 40% CS_2 , на які рідини можна розділити цей розчин перегонкою?

Задача 4.2.



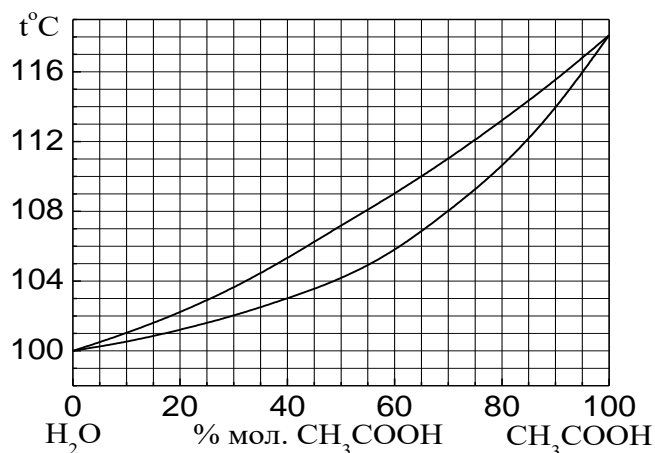
Який компонент і в якій кількості може бути виділений з системи, що містить 9кг CS_2 1 кг CH_3COCH_3

Задача 4.3.



Використовуючи діаграму «температура кипіння - склад», вкажіть, при якій температурі почнеться і закінчиться конденсація пара, який містить 20% мол. $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, який склад останніх крапель конденсату? На які рідини можна розділити систему, яка містить 80 моль.% $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$.

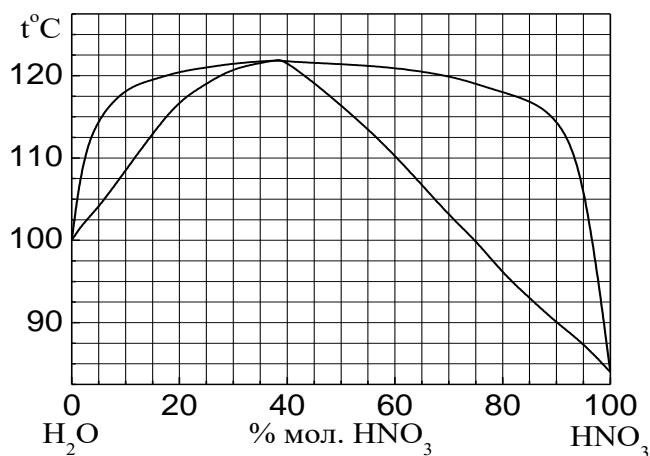
Задача 4.4.



За діаграмою зображеної на малюнку вкажіть, при якій температурі почнеться кипіння розчину, що містить 20% H_2O , який склад перших

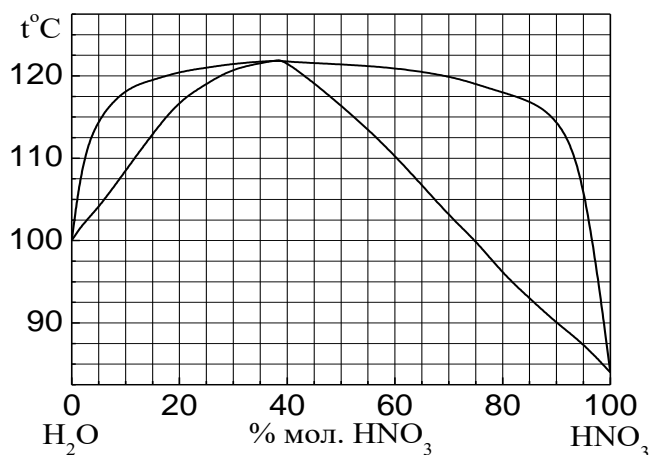
бульбашок пари, при якій температурі зникнуть останні крапельки рідини, який їхній склад? На які рідини можна розділити шляхом перегонки даний розчин.

Задача 4.5.



Використовуючи діаграму «температура кипіння - склад» визначте, який компонент і в якій кількості може бути виділений шляхом перегонки з розчину, що містить 10 моль HNO₃ і 90 моль H₂O?

Задача 4.6.



Який компонент і в якій кількості повинен бути доданий до суміші яка містить 50 моль HNO₃ і 20 моль H₂O, щоб отримати суміш азеотропного складу?

5. Практичне заняття № 5

5.1. Електропровідність розчинів електролітів

Багатоваріантна задача 5.1.

Розрахуйте константи рівноваги та теплоту дисоціації слабкого електроліту А, якщо при T_1 питомий опір розчину з концентрацією C_1 складає ρ_1 , а при T_2 питомий опір розчину з концентрацією C_2 дорівнює ρ_2 (таблиця). Визначить зміну енергії Гіббса та енергії Гельмгольца для реакції дисоціації при T_1 . Обчисліть рН розчину з концентрацією C_1 . Дані про рухомості іонів візьміть з довідника.

№	Електроліт	T_1, K	$C_1, \text{моль/л}$	$\rho_1, \text{Ом}\cdot\text{м}$	T_2, K	$C_2, \text{моль/л}$	$\rho_2, \text{Ом}\cdot\text{м}$
1	HCOOH	298	0,05	8,91	281	0,01	18,9
2	CH ₃ COOH	298	0,05	27,6	288	0,01	83,7
3	C ₃ H ₇ COOH	298	0,1	19,8	273	0,01	68,5
4	C ₆ H ₅ COOH	298	0,1	3,26	273	0,01	20
5	HCOOH	298	0,03	10,3	281	0,01	18,9
6	CH ₃ COOH	298	0,1	19,6	288	0,01	83,7
7	HCOOH	298	0,1	6,06	281	0,01	18,9
8	C ₆ H ₅ COOH	298	0,05	4,73	273	0,01	20
9	C ₃ H ₇ COOH	298	0,01	63,7	273	0,01	68,5
10	HCN	298	0,1	3100	313	0,01	5300
11	HNO ₂	298	0,01	13,4	303	0,01	10
12	H ₂ S	298	0,03	457	273	0,01	6090
13	HCN	298	0,03	5940	313	0,01	5300
14	HNO ₂	298	0,05	5,7	303	0,01	10
15	H ₂ S	298	0,1	250	273	0,01	6090

Задачі 5.2.

1. Питома електропровідність 0,1 М розчину оцтової кислоти дорівнює $0,051 \text{ Ом}^{-1}\text{м}^{-1}$. Обчислити ступінь дисоціації і константу дисоціації CH₃COOH. Еквівалентна електропровідність оцтової кислоти при нескінченному розбавленні дорівнює $\lambda_0 = 39,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/(\text{Ом}\cdot\text{екв})$.

2. Обчислити іонну силу розчину, який містить в 1 л 0,01 моля CaCl₂ і 0,1 моля Na₂SO₄.

3. Обчислити константу дисоціації йодноватистої кислоти (HIO), якщо рН її водного розчину з концентрацією 1000 моль/м³ складає 5,26.

4. Розрахувати рН водного розчину оцтової кислоти з концентрацією 23 моль/м³. Константу дисоціації оцтової кислоти прийняти рівною $1,63 \cdot 10^{-5}$ (температура 323 К).

5. Розрахувати рН водного розчину пропіонової кислоти (C₃H₆O₂) з концентрацією 0,02 моль/дм³. Константа дисоціації пропіонової кислоти становить $1,34 \cdot 10^{-5}$ (температура 298 К).

5.2. Гальванічний елемент.

Задачі 5.2.

1. Для гальванічного елемента $\text{Pt} | \text{Cr}^{3+}, \text{Cr}^{2+} || \text{Cu}^{2+}, \text{Cu}^+ | \text{Pt}$ активності іонів Cr^{3+} , Cr^{2+} , Cu^{2+} , Cu^+ у розчині дорівнюють відповідно 0,1; 0,05; 0,7 і 0,1. Запишіть рівняння реакцій, що проходять на аноді, катоді та в елементі у цілому. Розрахуйте ЕРС гальванічного елемента.

2. Для гальванічного елемента $\text{Zn} | \text{Zn}^{2+} || \text{Fe}^{3+}, \text{Fe}^{2+} | \text{Pt}$ активності іонів Zn^{2+} , Fe^{3+} і Fe^{2+} у розчині дорівнюють відповідно 0,02; 0,01 і 0,02. Запишіть рівняння реакцій, що проходять на аноді, катоді та в елементі у цілому. Розрахуйте ЕРС гальванічного елемента.

3. Для гальванічного елемента $\text{Cd} | \text{Cd}^{2+} || \text{Cu}^{2+} | \text{Cu}$ активності іонів Cd^{2+} і Cu^{2+} у розчині дорівнюють відповідно 0,04 і 0,1. Запишіть рівняння реакцій, що проходять на аноді, катоді та в елементі у цілому. Розрахуйте ЕРС гальванічного елемента.

4. Для гальванічного елемента $\text{Pt} | \text{V}^{3+}, \text{V}^{2+} || \text{Cu}^{2+}, \text{Cu}^+ | \text{Pt}$ активності іонів V^{3+} , V^{2+} , Cu^{2+} і Cu^+ у розчині дорівнюють відповідно 0,01; 0,05; 0,02 і 0,1. Запишіть рівняння реакцій, що проходять на аноді, катоді та в елементі у цілому. Розрахуйте ЕРС гальванічного елемента.

5. Для гальванічного елемента $\text{Pt} | \text{V}^{3+}, \text{V}^{2+} || \text{Co}^{3+}, \text{Co}^{2+} | \text{Pt}$ активності іонів V^{3+} , V^{2+} , Co^{3+} , Co^{2+} у розчині дорівнюють відповідно 0,1; 0,5; 0,1 і 0,01. Запишіть рівняння реакцій, що проходять на аноді, катоді та в елементі у цілому. Розрахуйте ЕРС гальванічного елемента.

Приклад розв'язання задач

Для окисно-відновного елемента $\text{Pt} | \text{V}^{3+}, \text{V}^{2+} || \text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}, \text{Cr}^{3+}, \text{H}^+ | \text{Pt}$ записати рівняння катодної, анодної та сумарної реакцій. Визначити значення ЕРС елемента при $T=298 \text{ K}$, якщо $a_{\text{V}^{3+}} = 0,04$, $a_{\text{V}^{2+}} = 0,06$, $a_{\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}} = 0,2$, $a_{\text{Cr}^{3+}} = 0,5$, $a_{\text{H}^+} = 1$, $a_{\text{H}_2\text{O}} = 1$. Визначити стандартну константу рівноваги електрохімічної реакції за $T=298 \text{ K}$.

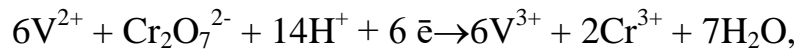
Розв'язання: Знаходимо у *довіднику* відповідні напівреакції та їхні стандартні потенціали та порівняємо їх:

$$E_{\text{V}^{3+}, \text{V}^{2+} / \text{Pt}}^0 = -0,255 \text{ В} < E_{\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}, \text{Cr}^{3+} / \text{Pt}}^0 = 1,333 \text{ В}$$

тому напівреакція $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-} + 14\text{H}^+ + 6\bar{e} = 2\text{Cr}^{3+} + 7\text{H}_2\text{O}$ є реакцією відновлення (перебігає в прямому напрямку), $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ є окисником, ця реакція в гальванічному елементі реалізується на катоді, який має знак (+).

Напівреакція $\text{V}^{3+} + \bar{e} = \text{V}^{2+}$ перебігає в зворотному напрямку ($\text{V}^{2+} \rightarrow \text{V}^{3+} + \bar{e}$) є реакцією окиснення, а V^{2+} є відновником, ця реакція в гальванічному елементі реалізується на аноді, який має знак (-).

Рівняння сумарної реакції (зверніть увагу на необхідність урівняти кількість електронів у напівреакціях):



Потенціали електродів знаходимо за рівнянням Нернста:

$$E_{V^{3+}, V^{2+} / Pt} = E_{V^{3+}, V^{2+} / Pt}^0 + \frac{RT}{zF} \cdot \ln \frac{a_{V^{3+}}}{a_{V^{2+}}}$$

$$E_{V^{3+}, V^{2+} / Pt} = -0,255 + \frac{8,314 \cdot 298}{1 \cdot 96486} \cdot \ln \frac{0,04}{0,06} = -0,265V$$

$$E_{Cr_2O_7^{2-}, Cr^{3+} / Pt} = E_{Cr_2O_7^{2-}, Cr^{3+} / Pt}^0 + \frac{RT}{zF} \cdot \ln \frac{a_{Cr_2O_7^{2-}}}{a_{Cr^{3+}}}$$

$$E_{Cr_2O_7^{2-}, Cr^{3+} / Pt} = 1,333 + \frac{8,314 \cdot 298}{6 \cdot 96486} \cdot \ln \frac{0,2 \cdot 1}{0,5^2 \cdot 1} = 1,332V$$

Значення ЕРС гальванічного елемента:

$$E = E_+ - E_- = E_{Cr_2O_7^{2-}, Cr^{3+} / Pt} - E_{V^{3+}, V^{2+} / Pt} = 1,332 - (-0,265) = 1,598V.$$

Стандартну константу рівноваги електрохімічної реакції можна обчислити за рівнянням :

$$K_a = \exp\left(\frac{zFE^0}{RT}\right) \quad (2.2)$$

для цього знаходимо значення стандартної ЕРС:

$$E^0 = E_{Cr_2O_7^{2-}, Cr^{3+} / Pt}^0 - E_{V^{3+}, V^{2+} / Pt}^0 = 1,333 - (-0,255) = 1,588V$$

і підставляємо отримане значення її у (2.2).

$$\text{Тоді маємо: } K_a = \exp\left(\frac{6 \cdot 96486 \cdot 1,588}{8,314 \cdot 298}\right) = e^{371}.$$

6. Практичне заняття № 6

6.1. Формальна кінетика

Задачі 6.1.

1. Початкова концентрація речовини А у реакції 1-го порядку $A \rightarrow B$ дорівнює $0,2 \text{ моль/дм}^3$. Початкова швидкість реакції (при $\tau = 0$) дорівнює $0,5 \text{ моль}/(\text{дм}^3 \cdot \text{с})$. Визначити константу швидкості реакції і концентрацію речовини А через $\tau = 30 \text{ с}$ після початку реакції.

2. Константа швидкості реакції $CH_3COCH_3(\text{г}) \rightarrow C_2H_4 + H_2 + CO$ за деякої температури дорівнює $0,026 \text{ хв}^{-1}$. Обчислити концентрацію ацетону (CH_3COCH_3) через 17 хв після початку реакції, якщо його вихідна концентрація 10 моль/м^3 .

3. Для деякої хімічної реакції $A \rightarrow B$ відома константа швидкості $0,002 \text{ хв}^{-1}$ (при $30 \text{ }^\circ\text{C}$). Визначити швидкість реакції і концентрацію речовини А через 400 хвилин після початку реакції, якщо вихідна концентрація А дорівнює $0,4 \text{ моль/л}$.

4. Реакція $A \rightarrow B$ першого порядку. За 10 секунд реакція проходить на 20% . За який час при тій же початковій концентрації А ця реакція пройде на 60% ?

5. Для реакції $A \rightarrow B$ отримана залежність концентрації речовини A від часу:

τ_A , хвилин	0	1150	2050	3600
C_A , моль/дм ³	0,5	0,375	0,3	0,202

Визначити порядок цієї реакції та значення константи швидкості.

6. Реакція першого порядку проходить на 30% за 35 хвилин. Розрахуйте швидкість цієї реакції при концентрації вихідної речовини-реагенту 0,01 моль/л.

7. При вивченні кінетики реакції гідролізу метилацетату отримані такі дані:

Час, с	0	1150	2050	3600
Концентрація метилацетату, моль/л	0,500	0,375	0,300	0,216

Визначити порядок реакції й її константу швидкості.

8. Для реакції інверсії цукрози $C_{12}H_{22}O_{11}$ (цукроза) + $H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6$ (глюкоза) + $C_6H_{12}O_6$ (фруктоза) при 298 К отримана залежність концентрації цукрози від часу:

τ , хв.	0	23,9	71,9	117,8
C , моль/дм ³	0,4	0,37	0,32	0,27

Визначити порядок реакції і її константу швидкості.

9. Для реакції $N_2O_5 = N_2O_4 + 0,5O_2$ при 298,2 К отримана залежність концентрації N_2O_5 від часу:

τ , годин	0	319	526	867
C , кмоль/м ³	2,33	1,91	1,67	1,36

Встановити порядок реакції і її константу швидкості.

6.2. Вплив температури на швидкість хімічної реакції

Задачі 6.2.

1. Для деякої хімічної реакції визначені константи швидкості: $k_1 = 3,46 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$ при $T_1 = 298,2 \text{ К}$ і $k_2 = 4,98 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$ при $T_2 = 318,2 \text{ К}$. Визначити час напівперетворення при 305,4 К.

2. Для реакції гідролізу етилацетату при $T_1 = 283,2 \text{ К}$ константа швидкості дорівнює $k_1 = 7,05 \cdot 10^{-3} \text{ хв}^{-1}$, а при $T_2 = 312,2 \text{ К}$ $k_2 = 29 \cdot 10^{-3} \text{ хв}^{-1}$. Визначити енергію активації й температурний коефіцієнт реакції.

3. Для реакції $HI + CH_3I \rightarrow CH_4 + I_2$ визначені константи швидкості при двох температурах: $k_1 = 0,024 \text{ см}^3 \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ при $T_1 = 460 \text{ К}$ і $k_2 = 0,005 \text{ см}^3 \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ при $T_2 = 450 \text{ К}$. Обчислити константу швидкості при $T_3 = 440 \text{ К}$.

4. Для реакції $H_2 + Br_2 \rightarrow 2HBr$ визначені константи швидкості при двох температурах: $k_1 = 0,0159 \text{ м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1} \cdot \text{хв}^{-1}$ при $T_1 = 550,7 \text{ К}$ і $k_2 = 0,0026 \text{ м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1} \cdot \text{хв}^{-1}$ при $T_2 = 524,6 \text{ К}$. Розрахувати енергію активації і температурний коефіцієнт швидкості реакції.

5. Для реакції $2\text{NO} \rightarrow \text{N}_2 + \text{O}_2$ визначені константи швидкості при двох температурах: $k_1 = 47059 \text{ м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1} \cdot \text{хв}^{-1}$ при $T_1 = 1525,2 \text{ К}$ і $k_2 = 1073 \text{ м}^3 \cdot \text{кмоль}^{-1} \cdot \text{хв}^{-1}$ при $T_2 = 1251,4 \text{ К}$. Обчислити константу швидкості при $T_3 = 1444,6 \text{ К}$.

6. У скільки разів зросте константа швидкості деякої хімічної реакції при підвищенні температури від $T_1 = 300 \text{ К}$ до $T_2 = 400 \text{ К}$, якщо енергія активації дорівнює 85 кДж/моль ?

7. Визначити у скільки разів зростає константа швидкості деякої реакції при $60 \text{ }^\circ\text{C}$ при введенні до системи каталізатора, якщо енергія активації при цьому знижується на $30,6 \text{ кДж/моль}$.

8. Визначити енергію активації і передекспоненційний множник в рівнянні Арреніуса для хімічної реакції $\text{A} \rightarrow \text{B}$, якщо при $20 \text{ }^\circ\text{C}$ константа швидкості дорівнює $5 \cdot 10^{-4} \text{ хв}^{-1}$, а при $30 \text{ }^\circ\text{C}$ дорівнює $1,2 \cdot 10^{-3} \text{ хв}^{-1}$.

9. Для деякої хімічної реакції при підвищенні температури від $35 \text{ }^\circ\text{C}$ до $50 \text{ }^\circ\text{C}$ швидкість реакції зростає у 5 разів. Визначити енергію активації та температурний коефіцієнт цієї реакції.

6.3. Каталіз

Задачі 6.3.

1 У скільки разів зміниться швидкість мутаротації глюкози при додаванні до розчину соляної кислоти загальної концентрації $0,01 \text{ моль/л}$? Константа швидкості цього гомогенно-каталітичного процесу описується емпіричним рівнянням: $k = 0,0096 + 0,258[\text{H}_3\text{O}^+] + 9750 [\text{OH}^-]$, с^{-1} . На скільки зміниться енергія активації при введенні каталізатора при 300 К , якщо величина передекспоненційного множника не змінюється?

2. Реакція мутаротації глюкози має перший порядок за концентрацією глюкози і каталізується кислотами (А) і основами (В). Константу швидкості першого порядку можна виразити за допомогою рівняння такого ж типу, які зустрічаються для реакцій, що протікають паралельними шляхами:

$$k = k_0 + k_{\text{H}^+}[\text{H}^+] + k_{\text{A}}[\text{A}] + k_{\text{B}}[\text{B}],$$

де k_0 – константа швидкості першого порядку за відсутності будь-яких кислот чи основ (крім води). Для цієї реакції при 291 К в середовищі, що містить $0,02 \text{ моль/л}$ ацетату натрію і різні концентрації оцтової кислоти, отримані наступні дані:

CH_3COOH , моль/л	0,020	0,105	0,199
$k \cdot 10^4$, хв^{-1}	1,36	1,40	1,46

Обчисліть k_0 і k_{A} . Додаток, що містить k_{H^+} , за цих умов дуже малий, і ним можна знехтувати.

3. При 25°C константа швидкості реакції: $\text{CH}_3\text{COOH} + \text{C}_2\text{H}_5\text{OH} = \text{CH}_3\text{COOC}_2\text{H}_5 + \text{H}_2\text{O}$, що відбувається в етанолі, дорівнює $3,49 \cdot 10^{-8} \text{ хв}^{-1}$. При проведенні цієї реакції в тому ж середовищі, але в присутності $0,05 \text{ моль/л}$ HCl , константа швидкості її становить $1,56 \cdot 10^{-2} \text{ хв}^{-1}$. Обчисліть каталітичну

активність HCl в даній реакції. На скільки зміниться енергія активації в даному випадку?

4. Під час крекінгу керосиново-солярової фракції на алюмосилікатному катализаторі протягом однієї доби з 50 тон сировини отримали 27,5 т бензину, 13 т вуглеводнів с $M = 0,26 \text{ кг/моль}$, 7 т крекінг-газу і 2 т коксу. Обчисліть селективність і продуктивність катализатора за бензином, якщо в процесі бере участь 0,25 т катализатора?

5. Мутаротація глюкози каталізується кислотами та основами і має перший порядок за концентрацією глюкози. Якщо в якості катализатора використовується хлорна кислота, то концентрацію іонів H^+ можна вважати рівною концентрації хлорної кислоти, а вплив перхлорат-іону можна не враховувати, так як він є дуже слабкою основою. Були отримані наступні значення констант швидкості першого порядку:

$[\text{HClO}_4]$, моль/л	0,0010	0,0048	0,0099	0,0192	0,0300	0,0400
k , хв. ⁻¹	1,25	1,38	1,53	1,90	2,15	2,59

Визначити константу k_0 (за відсутністю катализатора) і каталітичну константу k_{H^+} .

6. Реакція гідролізу етилацетату у водному середовищі (1-й порядок) каталізується як іонами гідроксонію, так і іонами гідроксилу. При 25°C константу швидкості каталітичної реакції можна виразити рівнянням:

$k_{\text{кат}} = 0,96 \cdot 10^{-8} + 0,00645[\text{H}_3\text{O}^+] + 6,5 [\text{OH}^-]$, хв.⁻¹. Обчисліть швидкість реакції гідролізу (моль/л·хв) при 25°C у розчині з концентрацією етилацетату 0,1 моль/л і концентрацією HCl $5 \cdot 10^{-5}$ моль/л.

7. Константи швидкості каталітичної реакції декарбоксілювання шавлієво-оцтової кислоти при 298K у присутності іонів Cu^{2+} з концентрацією 0,001 моль/л складає 0,143 хв.⁻¹, а у присутності іонів Al^{3+} з концентрацією 0,015 моль/л - 0,128 хв.⁻¹. Константа швидкості реакції без катализатора - 0,0024 хв.⁻¹. Визначте зміну енергії активації реакції у присутності обох катализаторів і порівняйте їх каталітичну активність.

8. Енергія активації реакції: $2\text{SO}_2 + \text{O}_2 = 2\text{SO}_3$ при 450°C дорівнює 280 кДж/моль. Катализатор на основі Fe_2O_3 , знижує енергію активації цієї реакції до 160 кДж/моль (при 630°C). А катализатори на основі V_2O_5 та Pt, які працюють при 450°C, знижують E_a до 92 і 68 кДж/моль. Обчисліть активності наведених катализаторів. Який з розглянутих катализаторів доцільніше використовувати на підприємстві? Відповідь обґрунтуйте.

9. Енергія активації реакції розкладу пероксиду водню у водному розчині дорівнює 75,4 кДж/моль. У присутності KJ (катализатор) - 56,5 кДж/моль., а у присутності колоїдної платини - 49,0 кДж/моль. Обчисліть і порівняйте каталітичну активність KJ і колоїдної платини у цьому процесі при 20°C. Запропонуйте механізм каталізу йодистим калієм.

10. Енергія активації реакції розкладу пероксиду водню у водному розчині дорівнює 75,4 кДж/моль. Константа швидкості при 293K дорівнює $3,3 \cdot 10^{-4}$ хв.⁻¹. За тієї ж температури у присутності 2г активованого вугілля $k = 0,0056$ хв.⁻¹, а у присутності 0,02г порошку двоокису марганцю - 0,14 хв.⁻¹. Обчисліть питомі каталітичні константи наведених катализаторів, порівняйте

їх каталітичну активність, оцініть зниження енергії активації реакції у їхній присутності.

7. Практичне заняття № 7

7.1. Поверхневі явища. Адсорбція.

1. Поверхнева ентропія рідкого етанолу при $t = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ становить $0,055\text{ мДж}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$. Чому дорівнює поверхневий натяг етанолу при цій температурі, якщо повна поверхнева енергія $38,1\text{ мДж}/\text{м}^2$?

2. При дослідженні впливу температури на поверхневий натяг хлорбензолу отримані такі дані:

T, К	273	283	293	303
σ , мДж/м ²	36	34,8	33,5	32,2

Обчислити повну поверхневу енергію і ентропію поверхневого шару.

3. При дослідженні впливу температури на поверхневий натяг етанолу отримані наступні дані:

T, К	273	283	293	303	313
$\sigma \cdot 10^3$, Дж/м ²	24,5	23,5	22,6	21,8	20,9

Визначити повну поверхневу енергію і ентропію поверхневого шару.

4. Розрахуйте капілярний тиск у краплі ртуті з дисперсністю 10 мкм^{-1} , якщо поверхневий натяг ртуті $0,475\text{ Дж}/\text{м}^2$.

5. Розрахувати роботу адгезії для бензолу, що змочує фторопласт. Поверхневий натяг бензолу $28,9\text{ мДж}/\text{м}^2$, крайовий кут $\theta = 46^{\circ}$.

6. Розрахувати роботу адгезії для гліцерину, що змочує фторопласт. Поверхневий натяг гліцерину $63,2\text{ мДж}/\text{м}^2$, крайовий кут $\theta = 110^{\circ}$.

7. Розрахувати роботу адгезії в системі вода-графіт. Поверхневий натяг води $\sigma(\text{H}_2\text{O}) = 71,96\text{ мДж}/\text{м}^2$. Обчислити коефіцієнт розтікання (при $\theta = 90^{\circ}$).

8. Визначити поверхневий натяг ртуті, якщо робота адгезії в системі ртуть-скло становить $170\text{ мДж}/\text{м}^2$, а крайовий кут дорівнює 130° .

9. У скільки разів тиск парів над краплями води діаметром $0,1\text{ мкм}$ більше, ніж тиск парів над плоскою поверхнею при $t = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Поверхневий натяг води $\sigma_{\text{води}} = 72\text{ мН}/\text{м}$, мольний об'єм води $18,05\text{ см}^3/\text{моль}$.

10. Визначити, у скільки разів тиск насиченої пари над краплями води діаметром $0,2\text{ мкм}$ більше, ніж тиск пари над плоскою поверхнею при $T = 303\text{ К}$. При $T = 298\text{ К}$ поверхневий натяг води $\sigma_{\text{води}} = 71,95\text{ мДж}/\text{м}^2$, $\partial\sigma/\partial T = -0,154\text{ мДж}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$. Прийняти мольний об'єм води $18,05\text{ см}^3/\text{моль}$.

11. Визначити у скільки разів тиск пари над краплями води діаметром $0,25\text{ мкм}$ більший, аніж тиск пари над плоскою поверхнею при $T = 298\text{ К}$. Поверхневий натяг води $\sigma(\text{H}_2\text{O}) = 72\text{ мДж}/\text{м}^2$, мольний об'єм води $18,05\text{ см}^3/\text{моль}$.

12. Визначити у скільки разів тиск парів над краплями води діаметром 2 мкм більше, ніж над плоскою поверхнею при $T = 298\text{ К}$. Поверхневий натяг води $\sigma_{\text{води}} = 71,95\text{ мДж}/\text{м}^2$, мольний об'єм води $18,05\text{ см}^3/\text{моль}$.

13. Визначити рівноважний тиск парів над краплями бензолу радіусом $0,5\text{ мкм}$ при $T = 313\text{ К}$. Тиск насиченої пари бензолу над плоскою поверхнею при цій температурі дорівнює $24,08 \cdot 10^3\text{ Па}$, мольний об'єм $93,4\text{ см}^3/\text{моль}$, поверхневий натяг $26,13\text{ мДж}/\text{м}^2$.

8. Практичне заняття № 8

8.1. Властивості дисперсних систем.

Приклади розв'язання типових задач

1. Розрахувати питому поверхню сферичних крапельок рідини (у $\text{м}^2/\text{м}^3$ і $\text{м}^2/\text{кг}$), а також діаметр крапельок, якщо густина рідини $13,54 \text{ г}/\text{см}^3$, дисперсність крапельок $0,5 \text{ мкм}^{-1}$.

Розв'язок

Дисперсність – це величина зворотна розміру (діаметру) частинки. Отже діаметр крапельок:

$$d = \frac{1}{D} = \frac{1}{0,5 \cdot 10^6} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ (м)}.$$

Питома поверхня – це відношення загальної поверхні фази до її загального об'єму (або маси). Для частинок сферичної форми питому поверхню знаходять за формулами:

$$S_{\text{ПИТ}} = 6D = \frac{6}{d} = \frac{6}{2 \cdot 10^{-6}} = 3 \cdot 10^6 \text{ (м}^2/\text{м}^3)$$

або

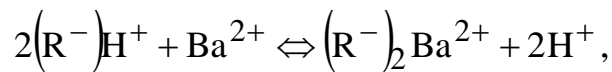
$$S_{\text{ПИТ}} = \frac{6}{d\rho} = \frac{6}{2 \cdot 10^{-6} \cdot 13,54 \cdot 10^3} = 221,6 \text{ (м}^2/\text{кг)}.$$

Відповідь: $3 \cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{м}^3$, $221,6 \text{ м}^2/\text{кг}$, $2 \cdot 10^{-6} \text{ м}$.

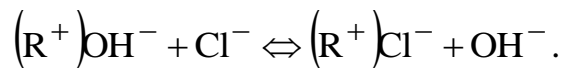
2. 2 л 0,05 н. водного розчину BaCl_2 знесолюють шляхом пропускання його через іонообмінні колонки. Скільки грамів катіоніту та аніоніту необхідно для цього, якщо ПОЄ = 2 мг-екв/г і для катіоніту, і для аніоніту?

Розв'язок

Для знесолення розчин солі слід пропустити через катіоніт у H^+ -формі:



а потім пропустити через аніоніт в OH^- -формі:



Кількість речовини BaCl_2 дорівнює:

$$n_{\text{екв}} = V \cdot C_N = 2 \cdot 0,05 = 0,1 \text{ г-екв.}$$

Оскільки $\text{ПОЄ} = \frac{n_{\text{екв}}}{m}$, то маса катіоніту та аніоніту буде становити:

$$m = 0,1 \text{ г-екв} / 2 \cdot 10^{-3} \text{ г-екв/г} = 50 \text{ г.}$$

Відповідь: 50 г аніоніту та 50 г катіоніту.

3. Визначити радіус частинок гідрозолу, якщо середній зсув частинки за 210 с складає 18,4 мкм. Температура 293 К, в'язкість середовища 10^{-3} Па·с.

Розв'язок

Величина середнього зсуву пов'язана з коефіцієнтом дифузії формулою Ейнштейна-Смолуховського:

$$\bar{\Delta}^2 = 2D\tau.$$

Знаходимо коефіцієнт дифузії:

$$D = \frac{\bar{\Delta}^2}{2\tau} = \frac{(18,4 \cdot 10^{-6})^2}{2 \cdot 210} = 8,06 \cdot 10^{-13} \text{ (м}^2/\text{с)}.$$

Коефіцієнт дифузії пов'язаний з радіусом частинки r рівнянням:

$$D = \frac{kT}{6\pi\eta r},$$

де $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постійна Больцмана; T – температура; η – в'язкість середовища.

Обчислюємо радіус частинок:

$$r = \frac{kT}{6\pi\eta D} = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 293}{6 \cdot 3,14 \cdot 10^{-3} \cdot 8,06 \cdot 10^{-13}} = 2,66 \cdot 10^{-7} \text{ (м)}.$$

Відповідь: $2,66 \cdot 10^{-7}$ м.

4. Частинки бентоніту з радіусом $r = 0,6$ мкм осідають у водному середовищі (густина $1,0$ г/см³) під дією сили тяжіння. Визначити час, за який частинка пройде шлях 20 см, якщо густина бентоніту $2,1$ г/см³, а в'язкість середовища $2 \cdot 10^{-3}$ Па·с.

Розв'язок

Рівняння для швидкості седиментації сферичних частинок у гравітаційному полі таке:

$$u = \frac{2g(\rho - \rho_0)r^2}{9\eta},$$

де $g = 9,81$ м/с² – прискорення вільного падіння; ρ – густина речовини частинок (дисперсної фази); ρ_0 – густина дисперсійного середовища; r – радіус частинок; η – в'язкість середовища.

Проводимо обрахунки, переводячи всі розмірності у СІ:

$$u = \frac{2 \cdot 9,81(2100 - 1000) \cdot (0,6 \cdot 10^{-6})^2}{9 \cdot 2 \cdot 10^{-3}} = 4,316 \cdot 10^{-7} \text{ (м/с)}.$$

Знаходимо час τ , за який частинка пройде шлях Δx , за допомогою елементарного рівняння:

$$u = \frac{\Delta x}{\tau} \Rightarrow \tau = \frac{\Delta x}{u} = \frac{20 \cdot 10^{-2}}{4,316 \cdot 10^{-7}} = 463392 \text{ (с)} \approx 128 \text{ (годин)}.$$

Відповідь: 463392 с.

5. Після встановлення дифузійно-седиментаційної рівноваги при температурі 298 К на висоті $h = 10$ см концентрація частинок сферичної форми утричі менша, ніж на висоті $h = 0$. Густина частинок 4 г/см^3 , густина середовища 1 г/см^3 . Визначити радіус частинок.

Розв'язок

Дифузійно-седиментаційна рівновага описується гіпсометричним рівнянням:

$$v_h = v_0 \exp\left(-\frac{v(\rho - \rho_0)gh}{kT}\right),$$

де v_h – концентрація частинок на висоті h ; v_0 – концентрація частинок на висоті $h = 0$; v – об'єм частинок; ρ – густина речовини частинок (дисперсної фази); ρ_0 – густина дисперсійного середовища, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння, $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ – постійна Больцмана; T – температура.

Оскільки концентрація частинок сферичної форми на висоті $h=10 \text{ см}=0,1 \text{ м}$ утричі менша, ніж на висоті $h = 0$, то маємо:

$$\begin{aligned} \frac{v_h}{v_0} &= \exp\left(-\frac{v(\rho - \rho_0)gh}{kT}\right), \\ \frac{1}{3} &= \exp\left(-\frac{v \cdot (4000 - 1000) \cdot 9,81 \cdot 0,1}{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 298}\right), \\ \frac{1}{3} &= \exp(-7,156 \cdot 10^{23} v), \\ \ln \frac{1}{3} &= -7,156 \cdot 10^{23} v, \\ v &= 1,535 \cdot 10^{-24} \text{ (м}^3\text{)}. \end{aligned}$$

Для сферичних частинок об'єм і радіус пов'язані рівнянням: $v = \frac{4}{3} \pi r^3$,

$$\text{звідси } r = \sqrt[3]{\frac{4v}{3\pi}} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot 1,535 \cdot 10^{-24}}{3 \cdot 3,14}} = 8,67 \cdot 10^{-9} \text{ (м)} = 8,67 \text{ (нм)}.$$

Відповідь: 8,67 нм.

6. Осмотичний тиск деякого гідрозолу становить 15 Па при температурі 15 °С. Яким буде осмотичний тиск цього золу, якщо температуру підвищити до 30°С?

Розв'язок

Осмотичний тиск золу прямо пропорційний температурі:

$$\pi = \frac{v}{N_A} RT.$$

Отже, маємо таке співвідношення для одного і того ж золу за двох різних температур:

$$\frac{\pi_1}{\pi_2} = \frac{T_2}{T_1}.$$

Таким чином, отримуємо:

$$\pi_2 = \pi_1 \cdot \frac{T_2}{T_1} = 15 \cdot \frac{273+30}{273+15} = 15,78 \text{ (Па)}.$$

Відповідь: 15,78 Па.

7. Розрахувати електрокінетичний потенціал поверхні частинок бентонітової глини, якщо при електрофорезі ці частинки за 15 хвилин зміщуються на 6 мм у напрямі аноду. Напруга між електродами 100 В, відстань між електродами 25 см, відносна діелектрична проникність середовища $\varepsilon = 78,2$, в'язкість $\eta = 8,94 \cdot 10^{-4}$ Па·с.

Розв'язок

Рівняння Гіббса-Смолуховського для електрофорезу має наступний вигляд:

$$\xi = \frac{\eta u}{\varepsilon_0 \varepsilon E},$$

де ξ – електрокінетичний потенціал; u – швидкість руху частинок; $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – діелектрична проникність вакууму; E – напруженість електричного поля.

Знаходимо швидкість руху частинок на підставі величини пройденого за даний час шляху:

$$u = \frac{\Delta x}{\tau} = \frac{6 \cdot 10^{-3}}{15 \cdot 60} = 6,67 \cdot 10^{-6} \text{ (м/с)}.$$

Знаходимо напруженість електричного поля як відношення напруги між електродами до відстані між ними:

$$E = \frac{V}{L} = \frac{100}{0,25} = 400 \text{ (В/м)}.$$

Обчислюємо електрокінетичний потенціал за рівнянням Гіббса-Смолуховського:

$$\xi = \frac{8,94 \cdot 10^{-4} \cdot 6,67 \cdot 10^{-6}}{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 78,2 \cdot 400} = 0,0215 \text{ (В)}.$$

Оскільки частинки рухаються у напрямі аноду (позитивного електроду), то вони заряджені негативно. Отже, остаточно, електрокінетичний потенціал дорівнює $\xi = -0,0215$ В.

Відповідь: $-0,0215$ В.

8. Розрахуйте, в якому випадку та у скільки разів інтенсивність розсіяного дисперсною системою світла більше: при освітленні синім світлом ($\lambda = 415$ нм) чи червоним світлом ($\lambda = 625$ нм).

Розв'язок

Відповідно до рівняння Релея інтенсивність світла, розсіяного дисперсною системою, зворотно пропорційна довжині хвилі світла: $I_p \sim \lambda^{-4}$. Тоді інтенсивність розсіяного синього світла більше, чим червоного у:

$$\frac{I_{p,1}}{I_{p,2}} = \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^4 = \left(\frac{625}{415}\right)^4 = 5,14 \text{ разів.}$$

Відповідь: синє світло розсіюється сильніше, ніж червоне, у 5,14 разів.

9. Визначити константу швидкості набрякання полімеру за наступними даними:

Час набрякання, хв	5	90	240	∞
Степінь набрякання, α	0,33	2,33	3,41	3,66

Розв'язок

Кінетичне рівняння процесу обмеженого набрякання ВМС в лінійній інтегральній формі може бути записано таким чином:

$$\ln \frac{\alpha_{\max}}{\alpha_{\max} - \alpha} = k\tau,$$

де α_{\max} – максимальний степінь набрякання; α – поточний степінь набрякання (на момент часу τ); k – константа швидкості набрякання.

Тоді константа швидкості набрякання дорівнює:

$$k = \frac{1}{\tau} \ln \frac{\alpha_{\max}}{\alpha_{\max} - \alpha}.$$

Обчислюємо k для різних моментів часу:

$$k = \frac{1}{5} \ln \frac{3,66}{3,66 - 0,33} = 0,019 \text{ (хв}^{-1}\text{)},$$

$$k = \frac{1}{90} \ln \frac{3,66}{3,66 - 2,33} = 0,011 \text{ (хв}^{-1}\text{)},$$

$$k = \frac{1}{240} \ln \frac{3,66}{3,66 - 3,41} = 0,011 \text{ (хв}^{-1}\text{)}.$$

Таким чином, середнє значення константи швидкості:

$$k = \frac{1}{3} \cdot (0,019 + 0,011 + 0,011) = 0,014 \text{ (хв}^{-1}\text{)}.$$

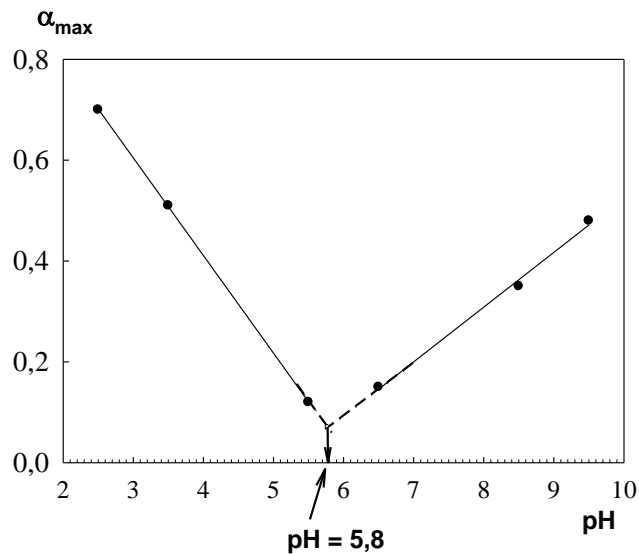
Відповідь: 0,014 хв⁻¹.

10. Визначити графічним методом ізоелектричну точку поліамфоліта за залежністю максимального ступеня набрякання α_{\max} від рН розчину:

рН	2,5	3,5	5,5	6,5	8,5	9,5
α_{\max}	0,7	0,51	0,12	0,15	0,35	0,48

Розв'язок

Будуємо графік залежності максимального ступеня набрякання α_{\max} від рН розчину:



Графік складається з двох прямолінійних відрізків. Координата (абсциса) точки перетину цих прямих – це і є ізоелектрична точка поліамфоліта: $\text{pH}_{\text{ИЕТ}} \approx 5,8$ (тобто це значення рН, при якому досягається мінімальне значення α_{\max}).

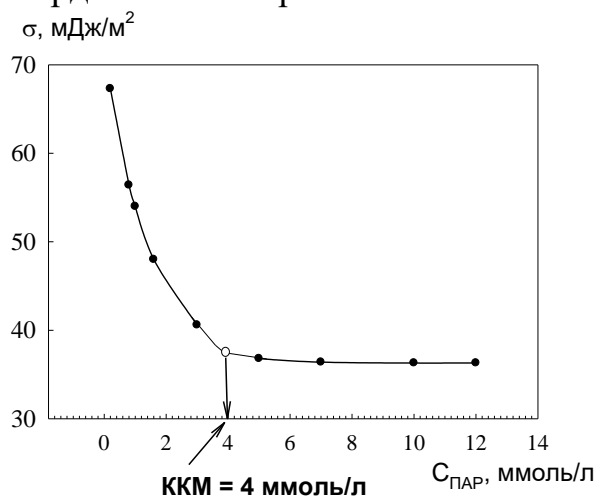
Відповідь: $\text{pH}_{\text{ИЕТ}} \approx 5,8$.

11. Визначити ККМ за залежністю поверхневого натягу ПАР водного розчину від концентрації:

$C_{\text{ПАР}}$, ммоль/л	0,2	0,8	1,0	1,6	3,0	5,0	7,0	10,0	12,0
σ , мДж/м ²	67,3	56,4	54,0	48,0	40,6	36,8	36,4	36,3	36,3

Розв'язок

Будуємо графік у координатах поверхневий натяг – концентрація ПАР:



За допомогою графіку знаходимо ККМ = 4 ммоль/л.

Відповідь: ККМ = 4 ммоль/л.

12. Розрахувати швидкість розвитку деформації в ньютонівській рідині, в'язкість якої $2 \cdot 10^{-3}$ Па·с, якщо напруження зсуву дорівнює 12 Па.

Розв'язок

Відповідно до закону Ньютона:

$$P = \eta \frac{d\gamma}{d\tau}.$$

Тоді швидкість розвитку деформації:

$$\frac{d\gamma}{d\tau} = \frac{P}{\eta} = \frac{12}{2 \cdot 10^{-3}} = 6000 \text{ (с}^{-1}\text{)}.$$

Відповідь: 6000 с^{-1} .

13. Розрахувати молекулярну масу поліметилметакрилату, якщо характеристична в'язкість його розчину в хлороформі при температурі 293 К складає 0,349 л/г. Константи в рівнянні Марка-Хаувінка-Куна дорівнюють відповідно $k = 4,9 \cdot 10^{-5}$, $\alpha = 0,8$.

Розв'язок

Згідно з рівнянням Марка-Хаувінка-Куна:

$$[\eta] = k \cdot M^\alpha,$$

де $[\eta]$ – характеристична в'язкість розчину полімеру; M – молекулярна маса полімеру.

Логарифмуючи це рівняння, маємо:

$$\ln[\eta] = \ln k + \alpha \ln M,$$

$$\ln 0,349 = \ln 4,9 \cdot 10^{-5} + 0,82 \ln M$$

$$-1,053 = -9,924 + 0,82 \ln M$$

$$\ln M = 10,82$$

$$M = \exp(10,82) \approx 5 \cdot 10^4 \text{ (г/моль)}.$$

Відповідь: $5 \cdot 10^4$ г/моль.

9. Практичне заняття № 9

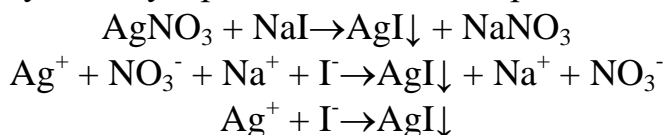
9.1. Будова міцел ліофобних золів. Коагуляція.

Приклади розв'язання типових задач

1. При достатньо повільному введенні водного розчину AgNO_3 (концентрація $0,015$ моль/дм³, об'єм $0,020$ дм³) у розчин NaI (концентрація $0,025$ моль/дм³, об'єм $0,025$ дм³) можливе утворення золю AgI . Запишіть формулу міцели золю.

Розв'язок

Рівняння реакції у молекулярній та повній і скороченій іонній формах:



Оскільки в осад випадає AgI , то саме він буде складати тверду фазу золю.

Відповідно до правила Фаянса-Панета, на поверхні кристалічної ґратки AgI можуть адсорбуватися або іони Ag^+ (у випадку надлишку AgNO_3), або іони I^- (у випадку надлишку NaI). Обчислимо, який електроліт в даному випадку у надлишку.

Кількість речовини AgNO_3 складає:

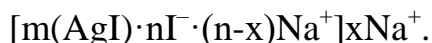
$$n_{\text{AgNO}_3} = CV = 0,015 \cdot 0,020 = 0,0003 \text{ моль.}$$

Кількість речовини NaI складає:

$$n_{\text{NaI}} = CV = 0,025 \cdot 0,025 = 0,000625 \text{ моль.}$$

Отже, у надлишку NaI . На поверхні AgI будуть адсорбуватися іони I^- , а протиіонами будуть іони Na^+ .

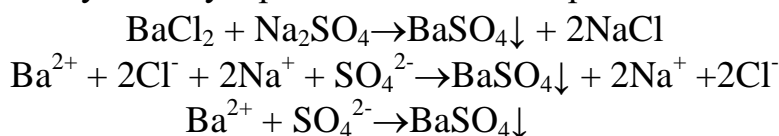
Пишемо формулу міцели золю:



2. Запишіть формули міцел золів, що утворюються за хімічною реакцією $\text{BaCl}_2 + \text{Na}_2\text{SO}_4 \rightarrow \dots$, у надлишку кожного з компонентів.

Розв'язок

Рівняння реакції у молекулярній та повній і скороченій іонній формах:



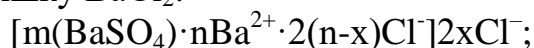
Оскільки в осад випадає BaSO_4 , то саме він буде складати тверду фазу золю.

Відповідно до правила Фаянса-Панета, на поверхні кристалічної ґратки BaSO_4 можуть адсорбуватися або іони Ba^{2+} (у випадку надлишку BaCl_2), або іони SO_4^{2-} (у випадку надлишку Na_2SO_4).

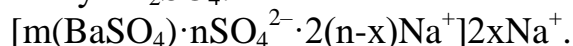
Відповідно, у першому випадку протиіонами будуть Cl^- , а у другому випадку – Na^+ .

Запишемо формули міцели золю:

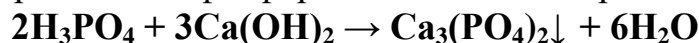
– для випадку надлишку BaCl_2 :



– для випадку надлишку Na_2SO_4 :



3. Запишіть формули міцел золів, що утворюються за хімічною реакцією між розведеними розчинами фосфорної кислоти та гідроксиду кальцію:



Оскільки в осад випадає $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, то саме він буде складати тверду фазу золя. Але структура міцели буде залежати від того, який саме з компонентів реакції буде взятий у надлишку. Тобто можливі дві структури:

а) у надлишку H_3PO_4 : $\{[(m \text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2)_x \cdot n \text{PO}_4^{3-} \cdot 3(n-x)\text{H}^+]^{3x-} \cdot 3x\text{H}^+\}$

б) у надлишку $\text{Ca}(\text{OH})_2$: $\{[(m \text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2)_x \cdot n\text{Ca}^{2+} \cdot 2(n-x)\text{OH}^-]^{2x+} \cdot 2x\text{OH}^-\}$

4. При вивченні кінетики коагуляції водного золю AgI коагулянтном K_2SO_4 отримали такі експериментальні дані:

5.

τ, c	0	40	200	280
$v_{\Sigma} \cdot 10^{-14}$	2,69	2,49	2,04	1,85

(v_{Σ} – концентрація частинок в одиниці об'єму).

Визначити час половинної коагуляції та дослідне значення константи швидкості швидкої коагуляції.

Розв'язок

Рівняння Смолуховського для швидкої коагуляції у лінійній формі має вигляд:

$$\frac{v_0}{v} = 1 + \frac{\tau}{\theta},$$

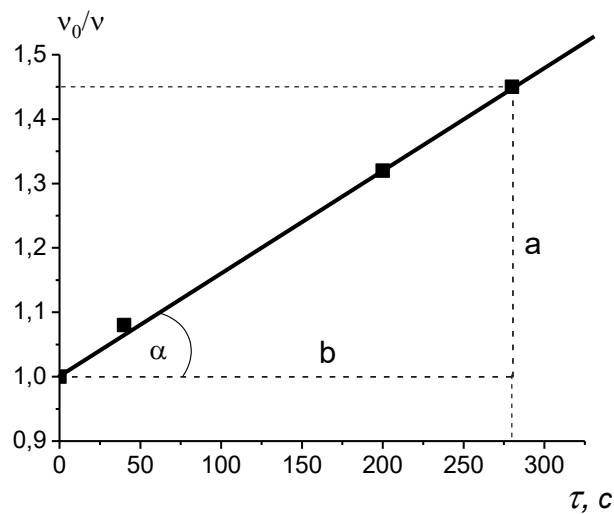
де v_0 – концентрація частинок у початковий момент часу ($\tau = 0$); v_{Σ} – концентрація частинок у довільний момент часу τ ; θ – час половинної коагуляції.

Побудова графіка у координатах $v_0/v_{\Sigma}, \tau$ дає пряму лінію, яка відтинає на осі ординат відрізок з довжиною 1 (одиниця) при нульовому значенні часу. А котангенс кута нахилу цієї прямої дорівнює величині θ .

Обчислюємо значення $\frac{v_0}{v}$ для кожного моменту часу ($v_0 = 2,69 \cdot 10^{14}$ частинок/ м^3):

τ, c	0	40	200	280
$\frac{v_0}{v}$	1	1,08	1,32	1,45

Будуємо графік в координатах $\frac{v_0}{v}, \tau$:



Знаходимо котангенс кута нахилу цієї прямої (відношення довжини суміжного катету до довжини протилежного катету):

$$\frac{1}{\Theta} = \operatorname{tg} \alpha = \frac{a}{b} = \frac{1,45 - 1}{280 - 0} = 1,607 \cdot 10^{-3}.$$

Час половинної коагуляції $\theta = 622,2$ с.

Константу швидкості коагуляції знаходять за рівнянням:

$$k = \frac{1}{v_0 \theta} = \frac{1}{2,69 \cdot 10^{14} \cdot 622,2} = 5,97 \cdot 10^{-18} \text{ (м}^3/\text{с)}.$$

Відповідь: 622,2 с; $5,97 \cdot 10^{-18}$ м³/с.

5. Розрахувати час половинної коагуляції аерозолі з дисперсністю 5 мкм⁻¹ і концентрацією $1,5 \cdot 10^{-3}$ кг/м³, якщо константа швидкості швидкої коагуляції за Смолюховським дорівнює $3 \cdot 10^{-16}$ м³/с. Густина частинок аерозолі вважати рівною 2,2 г/см³.

Розв'язок

Константа швидкості коагуляції за теорією Смолюховського:

$$k = \frac{1}{v_0 \theta}.$$

Тоді час половинної коагуляції можна знайти за рівнянням:

$$\theta = \frac{1}{v_0 k}.$$

Необхідно тепер розрахувати концентрацію частинок в одиниці об'єму v_0 .

Діаметр частинки:

$$d = \frac{1}{D} = \frac{1}{5 \cdot 10^{+6}} = 2 \cdot 10^{-7} \text{ (м)}.$$

Об'єм сферичної частинки:

$$V_{\text{ч}} = \frac{4}{3} \pi r^3 = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{d}{2}\right)^3 = \frac{4}{3} \cdot 3,14 \cdot \left(\frac{2 \cdot 10^{-7}}{2}\right)^3 = 4,19 \cdot 10^{-21} \text{ (м}^3\text{)}.$$

Загальний об'єм частинок, що приходить на одиницю об'єму аерозолі:

$$V_{\text{заг}} = \frac{c}{\rho} = \frac{1,5 \cdot 10^{-3}}{2,2 \cdot 10^3} = 6,82 \cdot 10^{-7} \text{ (м}^3\text{/м}^3\text{)}.$$

Концентрація (кількість) частинок в одиниці об'єму аерозолі:

$$v_0 = \frac{V_{\text{заг}}}{V_{\text{ч}}} = \frac{6,82 \cdot 10^{-7}}{4,19 \cdot 10^{-21}} = 1,628 \cdot 10^{14}.$$

Отже, час половинної коагуляції можна знайти за рівнянням:

$$\theta = \frac{1}{v_0 k} = \frac{1}{1,628 \cdot 10^{14} \cdot 3 \cdot 10^{-16}} = 20,5 \text{ (с)}.$$

Відповідь: 20,5 с.

Багатоваріантна задача 9.1.

Запишіть рівняння реакцій в повному, іонному та скороченому іонному вигляді. Запишіть формули міцел золів в надлишку кожного із компонентів А і В

вар.	А	В	вар.	А	В
1	H ₂ SO ₄	BaCl ₂	10	FeCl ₃	NaOH
2	NaI	AgNO ₃	11	K ₂ SO ₄	Ba(NO ₃) ₂
3	MgCl ₂	NaOH	12	CoCl ₃	K ₂ S
4	NH ₄ CNS	AgNO ₃	13	NiCl ₂	Li ₂ S
5	CaCl ₂	H ₂ SO ₄	14	SnCl ₂	K ₂ S
6	BaCl ₂	K ₂ SO ₄	15	CdCl ₂	H ₂ S
7	BeCl ₂	NH ₄ OH	16	AgNO ₃	HCl
8	(NH ₄) ₂ S	AgNO ₃	17	AgNO ₃	H ₂ S
9	AlCl ₃	NaOH	18	FeCl ₃	Ca(OH) ₂
	CrCl ₃	KOH		Hg ₂ (NO ₃) ₂	H ₂ SO ₄
	MnCl ₂	NaOH		K ₂ CrO ₄	AgNO ₃
	ZnCl ₂	K ₂ S		Pb(NO ₃) ₂	KOH

10. Список рекомендованої літератури

7,8-й семестр. «Фізична хімія»

1. Лебідь В.І. Фізична хімія. – Харків: Фоліо, 2005. – 478 с.
2. Гомонай В.І. Фізична та колоїдна хімія: Підручник. – Вінниця: НОВА КНИГА, 2007. - 496 с.
3. Стромберг А.Г., Семченко Д.П. Физическая химия.- М.: Высш. шк., 1988.- 495 с.
4. Физическая химия. Под ред. К.С. Краснова. - Т. 1. - М.: Высш. шк., 1982. - 687 с.
5. Физическая химия. Под ред. К.С. Краснова. - Т. 2. - М.: Высш. шк., 2001.- 319 с.
6. Голиков Г.А. Руководство по физической химии. - М.: Высш. шк., 1988. – 384 с.
7. Кудряшов И.В., Каретникова Г.С. Сборник примеров и задач по физической химии. - М.: Высш. шк., 1991.- 526 с.
8. Краткий справочник физико-химических величин под ред. Р. Равделя.- М.: Химия, 1983.- 231 с.

9-й семестр. «Колоїдна хімія»

1. Мчедлов-Петросян М.О., Лебідь В.М., Глазкова О.М., Єльцов С.В., Дубина О.М., Панченко В.Г. Колоїдна хімія. - Харків: Фоліо, 2005. – 304 с.
2. Гомонай В.І. Фізична та колоїдна хімія: Підручник. – Вінниця: НОВА КНИГА, 2007. - 496 с.
3. Фролов Ю.Г. Курс коллоидной химии – М. Химия, 1982. – 405с.
4. Фридрихсберг Д.А. Курс коллоидной химии – Л. Химия, 1984, 368с.
5. Шукин Е.Д. Коллоидная химия – М. МГУ, 1982. – 348с.
6. Лабораторные работы и задачи по коллоидной химии под ред. Ю.Г.Фролова – М. Химия, 1986. – 213с.
7. Воюцкий С.С. Курс коллоидной химии, М., Химия, 1975.