

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ  
ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ВАСИЛЯ СТУСА  
ФАКУЛЬТЕТ ХІМІЇ, БІОЛОГІЇ І БІОТЕХНОЛОГІЙ  
КАФЕДРА НЕОРГАНІЧНОЇ, ОРГАНІЧНОЇ ТА АНАЛІТИЧНОЇ ХІМІЇ

## **ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ З ОСНОВ ХІМІЧНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ**

*Навчально-методичний посібник*  
(для студентів спеціальності «Хімія»)

Вінниця  
2023

УДК 54:66(076.5)

Л 125

*Рекомендовано до друку Вченою радою факультету хімії, біології і біотехнологій  
(протокол № 5 від 24 січня 2023 р.)*

**Укладачі:** *К. С. Ютілова*, канд. хім. наук, доцент;  
*О. М. Швед*, д-р хім. наук, професор;  
*Л. С. Лісова*, старший лаборант;  
*Н. С. Марценюк*, старший лаборант.

**Рецензенти:** *С. А. Неділько*, д-р хім. наук, проф. кафедри неорганічної хімії  
КНУ імені Тараса Шевченка;  
*Г. М. Розанцев*, д-р хім. наук, проф., зав. кафедри неорганічної,  
органічної та аналітичної хімії ДонНУ імені Василя Стуса.

**Л 125** Лабораторний практикум з основ хімічної технології: навч.-метод.  
посібник / уклад. *К. С. Ютілова, О. М. Швед, Л. С. Лісова, Н. С. Марценюк.*  
Вінниця: ДонНУ імені Василя Стуса, 2023. 84 с.

Навчально-методичний посібник включає комплект лабораторних робіт з основ хімічної технології неорганічних і органічних речовин. Кожна робота містить теоретичну частину, методики розрахунку, експериментальні завдання та контрольні питання для самостійної підготовки до захисту лабораторних робіт. Частина робіт має розрахунковий характер для ознайомлення здобувачів з основами моделювання хіміко-технологічних процесів. У посібнику наведена техніка безпеки під час виконання лабораторних робіт.

Навчально-методичний посібник призначено для студентів СО «Бакалавр» і СО «Магістр» хімічних спеціальностей закладів вищої освіти. Посібник може бути корисним для аспірантів, викладачів та науковців.

УДК 54:66(076.5)

© Ютілова К. С., 2023

© Швед О. М., 2023

© Лісова Л. С., 2023

© Марценюк Н. С., 2023

© ДонНУ імені Василя Стуса, 2023

## ЗМІСТ

|  |    |
|--|----|
| ВСТУП.....   | 5  |
| ПРОГРАМА КУРСУ .....   | 6  |
| ПІДГОТОВКА ДО ВИКОНАННЯ, ОФОРМЛЕННЯ І ЗАХИСТ<br>ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ ..... | 10 |
| ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1 .....   | 11 |
| Матеріальний баланс хіміко-технологічної системи .....                   | 11 |
| <i>Задачі для самостійної роботи</i> .....                               | 14 |
| ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2 .....   | 17 |
| Співвідношення речовин у хіміко-технологічному процесі .....             | 17 |
| <i>Задачі для самостійної роботи</i> .....                               | 22 |
| ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3 .....   | 26 |
| Ізотермічний процес у хімічному реакторі .....                           | 26 |
| <i>Задачі для самостійної роботи</i> .....                               | 32 |
| ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4 .....   | 36 |
| Визначення вмісту іонів кальцію і магнію у воді.....                     | 36 |
| ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5 .....   | 40 |
| Омилення і гідроліз.....   | 40 |
| ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6 .....   | 44 |
| Добування кофеїну з чаю .....  | 44 |
| ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 7 .....   | 47 |
| Високотемпературні процеси .....   | 47 |
| ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 8 .....   | 50 |
| Синтези органічних речовин .....   | 50 |
| ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 9 .....   | 55 |
| Визначення йодного числа у нафтопродуктах.....                           | 55 |
| ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 10 .....  | 59 |
| Установлення вмісту хлориду калію у сильвініті .....                     | 59 |
| ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 11 .....  | 63 |
| Кінетика гетерогенної реакції окиснення сульфіту натрію.....             | 63 |

|  |    |
|--|----|
| ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 12 .....                                      | 69 |
| Одержання штучного карналіту з бішофіту $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ ..... | 69 |
| ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ.....   | 78 |
| 1. Загальні правила поведінки у хімічній лабораторії .....         | 78 |
| 2. Робота зі скляним посудом .....                                 | 79 |
| 3. Робота з їдкими хімічними речовинами .....                      | 79 |
| 4. Безпека під час високотемпературних процесів.....               | 79 |
| 5. Безпека використання електрообладнання .....                    | 80 |
| 6. Пожежна безпека .....   | 80 |
| 7. Долікарська допомога.....                                       | 81 |
| РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА .....                                     | 82 |

## ВСТУП

Курс із основ хімічної технології спрямований на засвоєння основних понять щодо теоретичних та експериментальних основ хімічного виробництва, формування у здобувачів здатності вирішувати різноманітні хіміко-технологічні проблеми. Зміст курсу нерозривно пов'язаний із практичним застосуванням здобутих знань. У лабораторії здобувачі набувають ключових навичок наукового дослідження та експериментального вивчення фізико-хімічних засад технологічних процесів хімічних виробництв. Обов'язковими рисами у портреті сучасного фахівця-хіміка є розуміння основних операцій промислового хімічного синтезу і вміння комбінувати знання з різних галузей хімічної науки: неорганічної, органічної, фізичної, аналітичної хімії для розрахунку технологічних критеріїв, складання матеріального балансу виробництва, визначення витратних коефіцієнтів.

Експериментальні роботи, описані у лабораторному практикумі з основ хімічної технології, виконуються на модельних установках. Поширені виробничі процеси відтворюються у масштабах лабораторії. Завдяки цьому здобувачі у майбутньому матимуть змогу швидко і професійно опанувати промислову апаратуру.

Лабораторний практикум структурований за окремими роботами, розрахованими зазвичай на виконання впродовж 2 академічних годин. Кожна робота містить теоретичні відомості щодо предмета дослідження. Для розрахункових робіт наведено приклади розв'язку теоретичних задач, а для експериментальних – детально описано перебіг виконання роботи і наведено необхідні формули для математичної обробки результатів. У кінці роботи запропоновано контрольні питання для самоперевірки. Посібник містить робочу програму курсу з основ хімічної технології, рекомендації щодо оформлення робіт і звітування з їх виконання, техніку безпеки і перелік рекомендованої літератури.

## ПРОГРАМА КУРСУ

**Основні поняття хімічної технології.** Роль та задачі хімічної технології як науки. Основні елементи хімічного виробництва. Основні напрями підвищення ефективності використання сировинних та енергетичних ресурсів. Основні напрями підвищення ефективності використання сировинних та енергетичних ресурсів. Роль математичного моделювання в розв'язанні задач проектування та експлуатації хіміко-технологічних систем (ХТС). Класифікація моделей ХТС. Основні види і способи опису ХТС. Функціональна, структурна, операторна і технологічна схема.

**Критерії оцінки ефективності хіміко-технологічного процесу.** Поняття і розрахунок ступеня перетворення, виходу продукту, інтегральної і диференціальної селективності, взаємозв'язок продуктивності, потужності та інтенсивності. Матеріальний і енергетичний баланс, їх розрахунок, табличне і графічне представлення.

**Рівноважні процеси. Швидкість хіміко-технологічних процесів.** Вплив температури, тиску концентрації реагентів, інертних газів та ін. Коефіцієнт швидкості, поверхня дотику, рушійна сила процесу. Способи збільшення коефіцієнта швидкості, поверхні зіткнення, рушійної сили процесу.

**Класифікація хіміко-технологічних процесів.** Класифікація процесів залежно від їх функціонального призначення і фізико-хімічних законів, що визначають напрямок і швидкість цих процесів. Сполучення в хіміко-технологічних апаратах різних типів процесів. Гідромеханічні процеси: осадження, циклонування, центрифугування, електроосадження, фільтрування, псевдозрідження. Теплові технологічні процеси. Технологічні способи нагрівання, охолодження. Поверхнева й об'ємна конденсація, випарювання, багаторазове випарювання, процес випарювання з тепловим насосом. Масообмінні технологічні процеси. Рушійна сила масообмінних процесів. Адсорбція та іонний обмін. Закономірності рівноваги і динаміки адсорбції. Абсорбція, абсорбційна колона. Фізико-хімічні основи і принципи організації розділення сумішей речовин методами абсорбції, ректифікації, екстракції. Ректифікаційна колона і принцип її дії. Сушіння, сушильні апарати, сушильні агенти. Механічні технологічні процеси. Хімічні реакційні процеси.

**Каталітичні процеси.** Характеристика промислового каталізу. Компоненти контактної маси. Гетерогенно-каталітичні процеси в хімічній промисловості. Технологічні характеристики каталізаторів: активність, температура запалювання, селективність дії, стійкість до отрути, поруватість, механічна міцність, теплопровідність. Види контактних апаратів, їх переваги та недоліки.

**Хімічні реактори.** Температурний режим роботи хімічних реакторів. Адіабатичні, ізотермічні і політермічні реактори. Зміна температури, концентрації реагентів і продуктів реакції. Спосіб підведення реагентів і відводу продуктів. Реактори періодичної, безперервної, напівперіодичної дії. Режим руху і перемішування реагентів. Реактор ідеального витиснення. Реактори повного змішування. Каскад реакторів повного змішування. Вимоги до промислових реакторів.

**Вода у хімічній промисловості. Технологія зв'язаного азоту.** Показники якості води та основні методи очищення. Реагентне зм'якшення води. Іоніти, класифікація і властивості. Іонообмінне зм'якшення і знесолення води. Значення технології зв'язування атмосферного азоту у виробництві. Фізико-хімічні основи зв'язування атмосферного азоту. Технологічна схема синтезу аміаку. Багатоступенева схема приготування і очищення азотоводневої суміші. Найбільш важливі вузли виробництва. Особливості циркуляційної схеми синтезу аміаку; фізико-хімічні основи вибору оптимальних умов синтезу; каталізатори у виробництві аміаку; утилізація «продувних» газів.

**Синтез азотної кислоти.** Технологічні рішення, що сприяють високому виходу продукту. Фізико-хімічні основи і апаратурне оформлення процесів селективного окислення аміаку, оксидів азоту та їх абсорбції. Каталітичне знешкодження відхідних газів. Виробництво розведеної азотної кислоти за умови атмосферного та підвищеного тиску. Методи виробництва концентрованої азотної кислоти.

**Виробництво сірчаної кислоти. Аміачний спосіб виробництва кальцинованої і харчової соди.** Сучасний стан виробництва сірчаної кислоти з різних видів сировини (природна сірка, колчедан, сірковмісні гази переробки поліметалічних руд, сірка і сірководень з нафт і природного газу). Особливості технологічних схем і апаратурного оформлення отримання сірчаної кислоти залежно від вихідної сировини. Окислювання сірчистого газу й одержання концентрованої сірчаної кислоти за методом «подвійний контакт, подвійна абсорбція». Екологічні проблеми в сірчано-кислотному виробництві. Технологічна схема виробництва кальцинованої соди аміачним методом. Каустифікація соди. Екологічні проблеми виробництва.

**Загальна характеристика технології основного органічного синтезу (ООС), сировинна база цієї галузі промисловості.** Нафта, її склад, підготовка та способи її первинної переробки. Технологічна схема ректифікації, нафтові фракції. Методи деструктивної переробки нафтових дистилатів. Умови, продукти і механізми процесів піролізу, термічного і каталітичного крекінгу.

**Методи переробки твердого палива.** Газоподібні джерела вуглеводневої сировини для ООС. Особливості та технологічна схема абсорбційного методу. Адсорбційний метод розділення газових сумішей. Метод гіперсорбції в поділі

газових сумішей. Методи переробки твердих горючих копалин. Особливості процесів напівкоксування і коксування. Газифікація та гідрогенізація. Способи отримання вуглеводневої сировини з нафтових фракцій. Карбамідна депарафінізація і адсорбція на цеолітах. Виділення твердих парафінів методом кристалізації із застосуванням виборчих розчинників. Способи отримання ароматичних сполук як сировини для ООС. Види процесу риформінгу. Схема установки каталітичного риформінгу. Промислові способи одержання ацетилену. Технологічна схема виробництва ацетилену окислювальним піролізом природного газу.

**Характеристика процесів приєднання і відщеплення водню та води. Гідроліз.** Отримання циклогексану гідруванням бензолу (умови, каталізатори, технологічна схема). Стирол, метод отримання дегідруванням етилбензолу (умови, типи реакторів, технологічна схема). Бутадієн-1,3; способи отримання. Процес одностадійного дегідрування н-бутану (умови, технологічна схема, методи виділення). Етиловий спирт, способи одержання, застосування. Умови та технологічна схема прямої гідратації етилену. Методи отримання гліцерину, застосування. Виробництво гліцерину лужним гідролізом епіхлоргідрину. Способи отримання етилацетату. Технологічна схема етерифікації.

**Особливості та види процесів окислення і галогенування.** Особливості та види процесів окислення. Формальдегід, способи добування, властивості, застосування. Умови і технологічна схема каталітичного окислення метану у формальдегід. Технологія кумольного способу виробництва фенолу і ацетону. Етиленоксид, властивості, способи одержання, застосування. Отримання етиленоксиду прямим окисленням етилену. Отримання малеїнового і фталевого ангідридів, технологічна схема, особливості виділення фталевого і малеїнового ангідридів. Особливості процесів фторування і йодування. Умови та технологічна схема газофазного хлорування метану. Хлорування ненасичених вуглеводнів, способи отримання 1,2-дихлоретану. Пряме хлорування етилену в рідкій фазі. Вінілхлорид, способи одержання. Отримання вінілхлориду гідрохлоруванням ацетилену. Реакції фторування. Фреони, властивості, технологічна схема отримання фреону-12.

**Промислові методи синтезу високомолекулярних сполук.** Класифікація ВМС. Ініціатори та механізми полімеризації і поліконденсації. Промислові способи проведення полімеризації. Особливості виділення полімерів у кожному з цих способів, переваги і недоліки. Промислові способи проведення поліконденсації. Види і характеристики поліетилену. Отримання поліетилену високого та низького тиску. Полістирол, застосування, отримання блоковою полімеризацією. Фенолальдегідні смоли, класифікація, застосування, отримання. Безперервний спосіб отримання новолачних смол. Спосіб виробництва резольних смол. Властивості і



застосування. Амінопласти і епоксидні полімери, властивості, отримання, застосування.

**Натуральні і синтетичні каучуки.** Каучуки загального і спеціального призначення. Методи отримання натрій-бутадієнового каучуку. Каучуки загального призначення. Методи отримання стереорегулярного бутадієнового (СКД) та ізопренового (СКІ) каучуків. Технологічна схема отримання СКІ. Виробництво бутадієн-стирольного і бутадієн-метилстирольного каучуків, підготовка сировини, технологічна схема процесу. Каучуки спеціального призначення. Технологія виробництва поліізобутиленового каучуку. Хлоропреновий каучук, одержання, властивості, технологічна схема. Гетероланцюгові еластомери. Силоксанові, полісульфідні і поліуретанові каучуки. Одержання і властивості. Виробництво гуми. Стадії технологічного процесу.

**Виробництво волокон.** Класифікація волокон, сировина для виробництва хімічних волокон, стадії технологічного процесу одержання хімічних волокон. Штучні волокна. Виробництво віскозного і ацетатного волокон. Синтетичні волокна. Виробництво поліефірних, поліамідних і поліакрилонітрильних волокон.

## **ПІДГОТОВКА ДО ВИКОНАННЯ, ОФОРМЛЕННЯ І ЗАХИСТ ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ**

Перед початком роботи здобувачі повинні ознайомитися з її змістом, розуміти хід роботи і вміти його описати. Для виконання роботи здобувачі мають отримати дозвіл від викладача.

У лабораторний журнал здобувача до початку виконання роботи мають бути внесені записи, що містять тему, мету, хід роботи і місце для нотаток під час виконання роботи. Лабораторний журнал має бути розбірливо підписаний, на першій сторінці має бути зазначена дата початку ведення журналу, а сторінки пронумеровані.

Після виконання роботи здобувачі повинні оформити результати і висновки згідно з вимогами, зазначеними у вказівках до лабораторної роботи. З метою підготовки до захисту лабораторної роботи здобувачі можуть скористатися контрольними питаннями, наведеними наприкінці роботи, і спробувати самостійно відповісти на них. Письмові відповіді на контрольні питання не є обов'язковою умовою для захисту лабораторної роботи і не будуть перевірятися.

Для успішного захисту лабораторної роботи здобувачі мають надати письмово оформлену лабораторну роботу, що містить, крім попередніх записів, обробку результатів роботи з усіма необхідними розрахунками і висновки. До того ж із метою оцінки розуміння здобувачем змісту роботи він має дати відповідь на кілька запитань від викладача за темою роботи. Підтвердженням успішного захисту лабораторної роботи є відповідна відмітка викладача у лабораторному журналі здобувача.

# ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

## Матеріальний баланс хіміко-технологічної системи

**Мета роботи:** навчитися складати матеріальний баланс хіміко-технологічної системи.

### Методика розрахунку

#### Загальні умови матеріального і теплового балансів

Хіміко-технологічний процес розглядається як сукупність перетворень і дій на речовини і потоки, що відбуваються у хімічному виробництві загалом, а також у його окремих частинах і апаратах. Основою розрахунку хіміко-технологічного процесу є його матеріальний і тепловий баланси.

**Матеріальний баланс** відображає закон збереження маси речовини. Для всіх речовин, що беруть участь у процесі, він може бути представлений рівнянням, ліву частину якого утворює маса вихідних речовин  $\Sigma G_{i,\text{вих}}$ , а праву – маса отриманих продуктів  $\Sigma G_{i,\text{кін}}$ :

$$\Sigma G_{i,\text{вих}} = \Sigma G_{i,\text{кін}}. \quad (1.1)$$

Крім балансу за всіма речовинами, використовують баланс за окремими компонентами. Для  $i$ -тої речовини:

$$G_{i,\text{вих}} = G_{i,\text{кін}} + \Delta G_{i,\text{пер}}, \quad (1.2)$$

де  $G_{i,\text{вих}}$  – маса  $i$ -тої речовини, що вступила у процес;  $G_{i,\text{кін}}$  – маса  $i$ -тої речовини, що залишилась після закінчення процесу;  $\Delta G_{i,\text{пер}}$  – маса  $i$ -тої речовини, що зазнала перетворень у системі.

Маса кінцевих речовин враховує  $\Sigma G_{k,\text{кін}}$  і  $G_{i,\text{кін}}$ , а також виробничі втрати сировини і готового продукту.

Джерелом є хімічна реакція. Якщо речовина утворюється, для неї  $\Delta G_{i,\text{пер}} > 0$ . Якщо  $\Delta G_{i,\text{пер}} < 0$ , то речовина перетворюється на іншу.

Якщо в елементі відбувається ряд перетворень речовини, то:

$$\Delta G_{i,\text{пер}} = \Sigma \Delta G_{ir}, \quad (1.3)$$

де  $\Delta G_{ir}$  – зміни кількості  $i$ -тої речовини у  $r$ -му перетворенні.

Декілька перетворень речовин можуть відбуватись або при перебігу складної реакції (тоді  $r$  стосується етапу складної реакції), або внаслідок послідовності перетворень (тоді  $r$  стосується чергового перетворення), або внаслідок і того, й іншого.

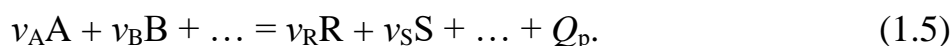
На основі матеріального балансу складають *тепловий баланс*, який відображає закон збереження енергії:

$$\Sigma q^{\text{вих}} + \Sigma q^{\text{пер}} = \Sigma q^{\text{кін}}, \quad (1.4)$$

де  $\Sigma q^{\text{вих}}$  і  $\Sigma q^{\text{кін}}$  – теплота або енергія, що відповідно вноситься реагентами або виноситься продуктами, залишками сировини, включно з втратами;  $\Sigma q^{\text{пер}}$  – енергія джерел – теплота хімічних реакцій і фізичних процесів (випаровування і конденсація, розчинення і десорбція, стиснення і розширення тощо), що перебігають у системі.

### Тепловий баланс під час хімічного перетворення

Кількість теплоти, що виділяється або поглинається під час перебігу реакції, визначається *тепловим ефектом реакції*  $Q_p$  або *змінюю енталпії реакції*  $\Delta H_p$ , причому  $Q_p = -\Delta H_p$ . Теплоту хімічної реакції розраховують, виходячи з термохімічного рівняння, у якому  $Q_p$  є тепловим ефектом реакції:



У літературі тепловий ефект  $Q_p$  зазвичай віднесений до стехіометрії реакції. Тоді загальна кількість теплоти у простій реакції:

$$\begin{aligned} q_{\text{пер}} &= Q_p(N_{A0} - N_A)/\nu_A = Q_p(N_{B0} - N_B)/\nu_B = \\ &= Q_p(N_{R0} - N_R)/\nu_R = \dots = Q_p \Delta N_i/\nu_i, \end{aligned} \quad (1.6)$$

де  $\Delta N_i$  – кількість вихідної речовини, що вступила у реакцію, або продукту, що утворився.

Якщо заданий ступінь перетворення  $X_A$  речовини А, загальна кількість теплоти від хімічної реакції *для простої реакції*:

$$q_{\text{пер}} = Q_p N_{A0} X_A / \nu_A; \quad (1.7)$$

*для складної реакції:*

$$q_{\text{пер}} = \Sigma Q_{pi} N_{A0} X_{Ai} / \nu_{Ai}. \quad (1.8)$$

Під час перебігу у системі фізичних процесів, пов'язаних із тепловими явищами (випаровування, конденсація, топлення, сублімація, розчинення):

$$q_{\text{пер}} = \Delta G_i Q_{\text{фп}}, \quad (1.9)$$

де  $\Delta G_i$  – маса  $i$ -того компонента, що змінив свій фазовий стан;  $Q_{\text{фп}}$  – питома теплота фазового переходу.

Зміна температури потоку внаслідок перебігу хімічного перетворення:

$$\Delta T = q_{\text{пер}} / (G \cdot c_p), \quad (1.10)$$

де  $G$  – маса потоку;  $c_p$  – його теплоємність.

### Форма представлення матеріального і теплового балансів

Результати розрахунку матеріального балансу записують у вигляді таблиці (табл. 1.1).

Виходячи з умови збереження маси, цифри у місцях, відмічених знаком  $\checkmark$ , мають співпадати. Таблиця теплового балансу має вигляд, аналогічний таблиці матеріального балансу.

Таблиця 1.1. Матеріальний баланс хіміко-технологічної системи

| Прибуток (вхід) |              |                |        | Витрата (вихід) |              |                |        |
|-----------------|--------------|----------------|--------|-----------------|--------------|----------------|--------|
| Речовина        | Кількість    |                |        | Речовина        | Кількість    |                |        |
|                 | кг           | м <sup>3</sup> | % мас. |                 | кг           | м <sup>3</sup> | % мас. |
| A               |              |                |        | A (залишок)     |              |                |        |
| B               |              |                |        | B (залишок)     |              |                |        |
| C               |              |                |        | R               |              |                |        |
|                 |              |                |        | S               |              |                |        |
| Всього          | $\checkmark$ |                | 100    | Всього          | $\checkmark$ |                | 100    |

*Приклад.* Скласти матеріальний баланс печі спалювання сірки продуктивністю 2 500 кг/год. Ступінь окислення сірки 0,95 (уся інша сірка сублимується і згорає поза піччю). Коефіцієнт надлишку повітря 1,5. Розрахунок проводити на продуктивність печі за спалюваною сіркою у кілограмах на годину.

#### Розв'язання

Дано:

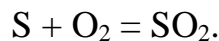
$$P_S = 2\,500 \text{ кг/год}$$

$$X_S = 0,95$$

$$\alpha_{\text{повітря}} = 1,5$$

Мат. баланс – ?

Процес спалювання сірки здійснюється за рівнянням:



Маса окисленої сірки:

$$G_S^{\text{ок}} = G_S X_S = 2\,500 \cdot 0,95 = 2\,375 \text{ кг/год.}$$

Маса сірки, що не вступила у реакцію:

$$G_S^{\text{зал}} = G_S (1 - X_S) = 2\,500 \cdot 0,05 = 125 \text{ кг/год.}$$

Маса кисню, витраченого на реакцію:

$$G_{O_2}^{\text{ок}} = G_S^{\text{ок}} \cdot 22,4 \cdot 1,5 / M_S = 2\,375 \cdot 22,4 \cdot 1,5 / 32 =$$

$$2\,493,75 \text{ м}^3/\text{год або}$$

$$2\,493,75 \cdot M_{O_2}/22,4 = 3\,562,5 \text{ кг/год.}$$

Маса азоту у повітрі:

$$G_{N_2} = G_{O_2}^{OK} \cdot \varphi_{N_2}/\varphi_{O_2} = 2\,493,75 \cdot 79/21 = 9\,381,25 \text{ м}^3/\text{год}$$

або

$$9\,381,25 \cdot M_{N_2}/22,4 = 11\,726,6 \text{ кг/год.}$$

Маса SO<sub>2</sub>, що утворився:

$$G_{SO_2} = G_S^{OK} \cdot M_{SO_2}/M_S = 2\,375 \cdot 64/32 = 4\,750 \text{ кг/год або}$$

$$4\,750 \cdot 22,4/M_{SO_2} = 1\,662,5 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Маса кисню, що не вступив у реакцію:

$$G_{O_2}^{зал} = G_{O_2}^{OK} - G_S^{OK} \cdot 22,4/M_S = 2\,493,75 -$$

$$2\,375 \cdot 22,4/32 = 831,25 \text{ м}^3/\text{год або}$$

$$831,25 \cdot M_{O_2}/22,4 = 1\,187,5 \text{ кг/год.}$$

Оформлюємо отримані дані у вигляді таблиці.

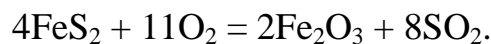
*Відповідь:*

| Прибуток          |           |                | Витрата           |           |                |
|-------------------|-----------|----------------|-------------------|-----------|----------------|
| Речовина          | Кількість |                | Речовина          | Кількість |                |
|                   | кг        | м <sup>3</sup> |                   | кг        | м <sup>3</sup> |
| S                 | 2 500     | –              | S                 | 125       | –              |
| Повітря, зокрема: |           |                | Повітря, зокрема: |           |                |
| O <sub>2</sub>    | 3 562,5   | 2 493,75       | SO <sub>2</sub>   | 4 750     | 1 662,5        |
| N <sub>2</sub>    | 11 726,6  | 9 381,25       | O <sub>2</sub>    | 1 187,5   | 831,25         |
|                   |           |                | N <sub>2</sub>    | 11 726,6  | 9 381,25       |
| Всього            | 17 789,1  | 11 875         | Всього            | 17 789,1  | 11 875         |

### *Задачі для самостійної роботи*

#### **В. 1**

Скласти матеріальний баланс випалювання 1 000 кг залізного колчедану під час стехіометричної подачі повітря:

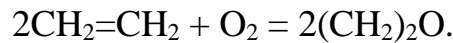


Колчедан містить пірит – FeS<sub>2</sub> і негорючі домішки. Вміст сульфуру в колчедані – 41 %, а в огарку – 0,5 %.

#### **В. 2**

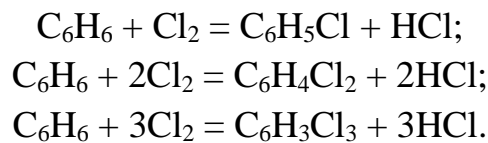
Скласти матеріальний баланс виробництва оксиду етилену прямим каталітичним окисненням етилену повітрям. Склад вихідної газової суміші – 3 % об. етилену

у повітрі. Ступінь окислення етилену 0,5. Розрахунок вести на 1 т оксиду етилену. Процес описується хімічним рівнянням:



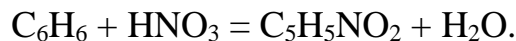
### В. 3

Скласти матеріальний баланс хлоратора у виробництві 1 т хлорбензолу. Вміст продуктів у масових частках, %: бензол – 65,0; хлорбензол – 32,0; дихлорбензол – 2,5; трихлорбензол – 0,5. Технічний бензол містить 97,5 % мас.  $\text{C}_6\text{H}_6$ , технічний хлор – 98 % мас.  $\text{Cl}_2$ . Процес перебігає через паралельні стадії:



### В. 4

Скласти матеріальний баланс нітратора продуктивністю 3 т/год нітробензолу. Вихід нітробензолу становить 98 % від теоретичного. Склад нітруючої суміші, % мас.: азотна кислота – 20; сірчана кислота – 60; вода – 20. Витрата нітруючої суміші – 4 кг на 1 кг бензолу. Нітрування бензолу здійснюється за реакцією:



### В. 5

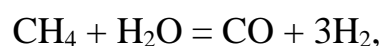
Розрахувати матеріальний баланс виробництва хлору методом електролізу водного розчину хлориду натрію:



Концентрація хлориду натрію у розчині 310 г/л. Ступінь розкладання 50 %. Густина розчину за умов електролізу 1,17 кг/л. Розрахунок проводити на 1 000 м<sup>3</sup> хлору.

### В. 6

Скласти матеріальний баланс процесу парової конверсії метану:



якщо ступінь перетворення  $\text{CH}_4$  дорівнює 0,95, мольне співвідношення вода : метан 3 : 1. Розрахунок проводити на 1 000 м<sup>3</sup> вихідної парогазової суміші.

### ***Контрольні питання***

1. Який закон лежить в основі матеріального балансу?
2. На основі якого закону складають тепловий баланс?
3. Наведіть приклад форми для запису матеріального балансу. Значення у яких комірках мають співпадати?
4. Які речовини записують до витрати у матеріальному балансі?
5. Які величини входять до прибутку і витрати теплового балансу?



## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

### Співвідношення речовин у хіміко-технологічному процесі

**Мета роботи:** навчитись обчислювати вихідні параметри та технологічні критерії хіміко-технологічного процесу за стехіометричними співвідношеннями між реагентами та продуктами хімічної реакції.

#### **Методика розрахунку Витратні коефіцієнти**

Технічна досконалість процесу або виробництва визначається його технічними показниками.

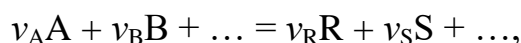
**Витратний коефіцієнт  $K$**  визначає витрату сировини, води, палива, електроенергії на одиницю виробленої продукції:

$$K = G_{\text{вих}} / G \quad (2.1)$$

де  $G_{\text{вих}}$  – витрати сировини, палива, енергії під час виробництва продукту у кількості  $G$ .

Витратні коефіцієнти можуть вимірюватись у тоннах сировини, у кубічних метрах газу, у кіловат-годинах електроенергії на тонну продукту. Витратний коефіцієнт відображає ефективність цієї технології за ресурсо- та енергозбереженням сировини і часто є визначним показником ефективності процесу.

**Теоретичний витратний коефіцієнт  $K_T$**  враховує стехіометричні співвідношення, за якими відбувається перетворення вихідних речовин на цільовий продукт. Для цього використовують стехіометричне рівняння хімічного перетворення:



що показує, у яких співвідношеннях речовини вступають у хімічну взаємодію одна з одною. Якщо перетворилось  $N_A$  моль речовини А, то витрачається  $N_A(\nu_B / \nu_A)$  моль речовини В та утворюється  $N_A(\nu_R / \nu_A)$  моль продукту R і  $N_A(\nu_S / \nu_A)$  моль продукту S.

**Практичний витратний коефіцієнт  $K_{\text{пр}}$**  враховує виробничі втрати на всіх стадіях процесу, а також побічні реакції, якщо вони є. Якщо  $\Phi_{\text{втр}}$  – втрати продукту (у частках від витраченої кількості), то:

$$K_{\text{пр}} / K_T = 1 + \Phi_{\text{втр}}. \quad (2.2)$$

## Технологічні критерії

**Ступінь перетворення  $X$**  – показник, що відображає частку повноти використання сировини у хіміко-технологічному процесі. Він дорівнює частці витраченої сировини в апараті:

$$X_j = \frac{n_{j,0} - n_{j,F}}{n_{j,0}} = \frac{\Delta n_j}{n_{j,0}}, \quad (2.3)$$

де  $n_{j,0}$  – кількість речовини на вході в апарат;  $n_{j,F}$  – кількість речовини на виході з апарату.  $X_j$  приймає значення від 0 до 1.

$$X_A = \frac{\Delta n_A}{n_{A,0}}. \quad (2.4)$$

Ступінь перетворення компонента у надлишку завжди менший за ступінь перетворення другого компонента і менший за 1, навіть якщо ступінь перетворення другого компонента дорівнює 1.

**Вихід продукту  $\Phi$**  – показник, що оцінює ефективність роботи апарату за співвідношенням між кількістю отриманого продукту та максимальною теоретично можливою кількістю продукту за наявних умов:

$$\Phi_R = \frac{n_R}{n_{R,max}}. \quad (2.5)$$

У необоротних процесах максимальна кількість продукту буде отримана, коли буде використана вся сировина. В оборотних процесах максимальна кількість продукту досягається під час досягнення рівноваги.

**Селективність  $\varphi$**  – критерій, що відображає ефективність перебігу цільової реакції в апараті, порівняно з побічними.

**Повна (інтегральна) селективність** – відношення кількості вихідних речовин, витрачених на цільову реакцію, до загальної витрати реагентів:

$$\varphi = \frac{\Delta n_{A,цїл}}{\Delta n_{A,заг}}. \quad (2.6)$$

**Миттєва (диференціальна) селективність** – відношення швидкості цільової реакції до сумарної швидкості усіх реакцій, у яких бере участь вихідний компонент:

$$\varphi = \frac{\omega_{цїл}}{\omega_{заг}}. \quad (2.7)$$

**Продуктивність  $P$**  характеризує кількість продукції, яку видає апарат за одиницю часу.

$$P_R = C_{A0}V_0, \quad (2.8)$$

де  $C_{A0}$  – початкова концентрація реагенту А,  $V_0$  – об’ємна швидкість витрачання речовини А.

Продуктивність зазвичай вимірюється у тоннах на добу (т/добу), тисячах тонн на рік (тис. т/рік) або у кілограмах на годину (кг/год). Максимальна продуктивність називається **потужністю**.

**Інтенсивність** характеризує ступінь завантаженості апарату роботою, тобто напруженість роботи апарату, і виражається як відношення продуктивності до величини, що характеризує розмір апарату (об’єм чи площа поверхні контакту).

### Приклади

**П. 1.** Розрахуйте витратний коефіцієнт за природним газом, що містить 97 % об’ємних часток метану, у виробництві оцтової кислоти з ацетальдегіду. Вихід ацетилену з метану  $\Phi_{\text{ац}} = 15\%$ , вихід ацетальдегіду з ацетилену  $\Phi_{\text{ацд}} = 60\%$ , а вихід оцтової кислоти з ацетальдегіду  $\Phi_{\text{оц}} = 90\%$ .

#### Розв’язання

|                                      |  |
|--------------------------------------|--|
| Дано:                                | $2\text{CH}_4 \rightarrow \text{CH}\equiv\text{CH} + 3\text{H}_2;$   |
| $G_{\text{CH}_4} = 97\% \text{ об.}$ | $\text{CH}\equiv\text{CH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{CHO};$   |
| $\Phi_{\text{ац}} = 15\%$            | $\text{CH}_3\text{CHO} + 0,5\text{O}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{COOH};$  |
| $\Phi_{\text{ацд}} = 60\%$           | $G_{\text{оц}} = 1 \text{ т.}$   |
| $\Phi_{\text{оц}} = 90\%$            | $K_{\text{CH}_4} = G_{\text{оц}} \cdot M(\text{CH}_4) / [M(\text{оц}) \cdot \Phi_{\text{оц}} \cdot \Phi_{\text{ацд}} \cdot \Phi_{\text{ац}}];$ |
| $K_{\text{пр. газ}} - ?$             | $M(\text{CH}_4) = 16; M(\text{оц}) = 60.$  |
|                                      | $K_{\text{CH}_4} = 1 \cdot 2 \cdot 16 / (60 \cdot 0,9 \cdot 0,6 \cdot 0,15) = 6,58 \text{ т метану}$   |
|                                      | $\text{на } 1 \text{ т оцтової кислоти.}$  |
|                                      | $K_{\text{пр. газ}} = 6,58 \cdot 1\,000 \cdot 22,4 / (16 \cdot 0,97) = 9\,497 \text{ м}^3/\text{т.}$   |

**Відповідь:**  $K_{\text{пр. газ}} = 9\,497 \text{ м}^3/\text{т.}$

**П. 2.** Аналіз показав, що апатито-нефелінова руда містить 21,35 % масових часток  $\text{P}_2\text{O}_5$  і 7,56 % масових часток  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Розрахувати окремий вміст у руді апатиту  $3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 2\text{CaF}_2$  і нефеліну  $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2$ , якщо  $\text{P}_2\text{O}_5$  зв’язаний у формі апатиту, а  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – у формі нефеліну.

*Розв'язання*

|                              |   |
|------------------------------|---|
| Дано:                        | Можна вважати, що   |
| $G_{P_2O_5} = 21,35 \%$ мас. | $3P_2O_5 \rightarrow 3Ca_3(PO_4)_2 \cdot CaCl_2 \cdot 2CaF_2$ та    |
| $G_{Al_2O_3} = 7,56 \%$ мас. | $Al_2O_3 \rightarrow Na_2O \cdot K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 4SiO_2$ . |
| $G_{ап} - ?$                 | Тоді  |
| $G_{неф} - ?$                | $G_{ап} = G_{P_2O_5} \cdot M(ап) / [3 \cdot M(P_2O_5)]$ ,           |
|                              | $G_{неф} = G_{Al_2O_3} \cdot M(неф) / M(Al_2O_3)$ .                 |
|                              | $M(ап) = 1\,197$ ; $M(P_2O_5) = 142$ ; $M(неф) = 498$ ;             |
|                              | $M(Al_2O_3) = 102$ .  |
|                              | $G_{ап} = 21,35 \cdot 1\,197 / (3 \cdot 142) = 60 \%$ мас.          |
|                              | $G_{неф} = 7,56 \cdot 498 / 102 = 36,9 \%$ мас.                     |

*Відповідь:*  $G_{ап} = 60 \%$  мас.,  $G_{неф} = 36,9 \%$  мас.

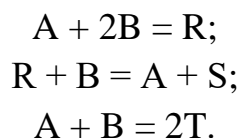
**П. 3.** Визначити ступінь перетворення  $X_B$  і склад реакційної суміші для реакції  $A + 2B = 2R + S$ , якщо  $X_A = 0,6$ ,  $C_{A_0} = 1$  кмоль/м<sup>3</sup>,  $C_{B_0} = 1,5$  кмоль/м<sup>3</sup>.

*Розв'язання*

|                                      |  |
|--------------------------------------|--|
| Дано:                                | $A + 2B = 2R + S$ .  |
| $X_A = 0,6$                          | Кількість речовини А, що вступила у реакцію:                                   |
| $C_{A_0} = 1$ кмоль/м <sup>3</sup>   | $C_{A_0} - C_A = C_{A_0} \cdot X_A = 1 \cdot 0,6 = 0,6$ кмоль/м <sup>3</sup> . |
| $C_{B_0} = 1,5$ кмоль/м <sup>3</sup> | Кількість речовини В, що вступила у реакцію, згідно                            |
| $X_B - ?$                            | з рівнянням:   |
| $C_A, C_B, C_R, C_S - ?$             | $C_{B_0} - C_B = 2 \cdot 0,6 = 1,2$ кмоль/м <sup>3</sup> ;                     |
|                                      | $X_B = (C_{B_0} - C_B) / C_{B_0} = 1,2 / 1,5 = 0,8$ ;                          |
|                                      | $C_A = C_{A_0}(1 - X_A) = 1 \cdot 0,4 = 0,4$ кмоль/м <sup>3</sup> ;            |
|                                      | $C_B = C_{B_0} - (C_{B_0} - C_B) = 1,5 - 1,2 = 0,3$ кмоль/м <sup>3</sup> ;     |
|                                      | $C_R = 2 \cdot (C_{A_0} - C_A) = 2 \cdot 0,6 = 1,2$ кмоль/м <sup>3</sup> ;     |
|                                      | $C_S = C_{A_0} - C_A = 0,6$ кмоль/м <sup>3</sup> .                             |

*Відповідь:*  $X_B = 0,8$ ;  $C_A = 0,4$  кмоль/м<sup>3</sup>;  $C_B = 0,3$  кмоль/м<sup>3</sup>;  $C_R = 1,2$  кмоль/м<sup>3</sup>;  $C_S = 0,6$  кмоль/м<sup>3</sup>.

**П. 4.** У реакторі перебігають реакції:



Початкові концентрації, кмоль/м<sup>3</sup>:  $C_{A_0} = 2$ ;  $C_{B_0} = 2,3$ ;  $C_{R_0} = C_{S_0} = C_{T_0} = 0$ .  
Об'ємна витрата суміші  $5 \cdot 10^{-2}$  м<sup>3</sup>/с. Кінцеві концентрації, кмоль/м<sup>3</sup>:  $C_R = 0,2$ ;

$C_S = 0,4$ ;  $C_A = 1,4$ . Визначте загальний і часткові ступені перетворення речовини В за реакціями; продуктивність за продуктом R.

*Розв'язання*

Дано:

$$C_{A_0} = 2 \text{ кмоль/м}^3$$

$$C_{B_0} = 2,3 \text{ кмоль/м}^3$$

$$C_R = 0,2 \text{ кмоль/м}^3$$

$$C_S = 0,4 \text{ кмоль/м}^3$$

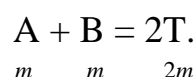
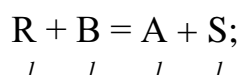
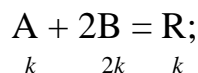
$$C_A = 1,4 \text{ кмоль/м}^3$$

$$V_0 = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$$

$$X_B - ?$$

$$P_R - ?$$

Позначимо кількість речовини у першому рівнянні за допомогою змінної  $k$ , у другому – змінної  $l$  і у третьому – змінної  $m$ :



За умовою є відомими дані щодо початкових і кінцевих концентрацій речовин R, S, A. Речовина R утворюється у першій стадії і витрачається у другій, речовина S лише утворюється у другій стадії, речовина A витрачається у першій і третій стадії та утворюється у другій. Отже, складемо систему рівнянь:

$$\begin{cases} k - l = 0,2; \\ l = 0,4; \\ 2 - k + l - m = 1,4. \end{cases}$$

$$l = 0,4;$$

$$2 - k + l - m = 1,4.$$

Виражаємо значення  $k$ :

$$k = 0,4 + 0,2 = 0,6.$$

Виражаємо значення  $m$ :

$$m = 2 - 0,6 + 0,4 - 1,4 = 0,4.$$

Знаходимо концентрацію B:

$$C_B = C_{B_0} - 2k - l - m = 2,3 - 2 \cdot 0,6 - 0,4 - 0,4 = 0,3 \text{ кмоль/м}^3.$$

Розраховуємо загальний ступінь перетворення B:

$$X_{B, \text{заг}} = (C_{B_0} - C_B) / C_{B_0} = (2,3 - 0,3) / 2,3 = 0,87.$$

Речовина B реагує у кожній стадії реакції, тому розраховуємо ступені перетворення за окремими стадіями:

$$X_{B_1} = 2k / C_{B_0} = 2 \cdot 0,6 / 2,3 = 0,52;$$

$$X_{B_2} = l / (C_{B_0} - 2k) = 0,4 / (2,3 - 2 \cdot 0,6) = 0,36;$$

$$X_{B_3} = m / (C_{B_0} - 2k - l) = 0,4 / (2,3 - 2 \cdot 0,6 - 0,4) = 0,57.$$

Продуктивність за речовиною R розраховуємо за стадією, у якій ця речовина утворюється (перша елементарна реакція):

$$P_R = C_R^1 \cdot V_0 = 0,6 \cdot 5 \cdot 10^{-2} = 0,03 \text{ кмоль/с, або } 30 \text{ моль/с.}$$

*Відповідь:*  $X_{B, \text{заг}} = 0,87$ ;  $X_{B_1} = 0,52$ ;  $X_{B_2} = 0,36$ ;  $X_{B_3} = 0,57$ ;  $P_R = 30 \text{ моль/с.}$

### Задачі для самостійної роботи

#### В. 1

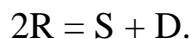
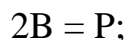
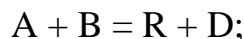
**1.1.** Хімічний склад віконного (силікатного) скла виражається формулою  $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2$ . Скло отримують із соди  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , вапняка  $\text{CaCO}_3$ , піску  $\text{SiO}_2$ . Розрахувати теоретичні коефіцієнти за сировиною під час виробництва скла, якщо сода містить 93,8 %  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , вапняк – 90,5 %  $\text{CaCO}_3$  і пісок – 99,0 %  $\text{SiO}_2$ .

*Відповідь:*  $K_{\text{сода}} = 236,4 \text{ кг}$ ;  $K_{\text{вапняку}} = 231,16 \text{ кг}$ ;  $K_{\text{піску}} = 760,7 \text{ кг}$ .

**1.2.** Які маси купоросної олії (96 %  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) і сірчаної кислоти з концентрацією  $\text{H}_2\text{SO}_4$  64 % треба взяти, щоб отримати 2 800 кг 83 %-вої  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ?

*Відповідь:*  $G_{\text{куп.м.}} = 1,66 \text{ т}$ ;  $G_{\text{сірч.к.}} = 1,14 \text{ т}$ .

**1.3.** У реакторі ідеального змішування перебігають реакції:



Початкові концентрації, кмоль/м<sup>3</sup>:  $C_{A_0} = 0,1$ ;  $C_{B_0} = 0,3$ ;  $C_{R_0} = C_{D_0} = C_{P_0} = C_{S_0} = 0$ . Об'ємна витрата суміші  $7,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ . Кінцеві концентрації, кмоль/м<sup>3</sup>:  $C_R = 0,028$ ;  $C_S = 0,012$ ;  $C_D = 0,034$ . Визначте ступені перетворення речовини B за реакціями; продуктивність за продуктом R.

*Відповідь:*  $X_{B, \text{заг}} = 0,26$ ;  $X_{B_1} = 0,07$ ;  $X_{B_2} = 0,20$ ;  $P_R = 29 \text{ моль/с.}$

#### В. 2

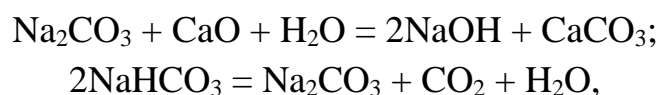
**2.1.** Які маси залізного купоросу  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  і хромового ангідриду  $\text{CrO}_3$  знадобляться для отримання 1 т залізохромового каталізатора конверсії CO, що має склад: 90 %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ; 10 %  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ?

*Відповідь:*  $G_{\text{ЗК}} = 3,13 \text{ т}$ ;  $G_{\text{ХА}} = 131,6 \text{ кг}$ .

**2.2.** Вологість 200 кг сірчаного колчедану під час зберігання на повітрі змінилася з 3 до 6 % масових часток. Як за таких умов змінилася маса колчедану?

*Відповідь:*  $\Delta G_{\text{ЗК}} = 6,4 \text{ кг}$ .

**2.3.** Визначте ступінь перетворення  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  і вихід продукту під час отримання вапняним способом 10 т 40 %-го розчину NaOH:



якщо для виробництва взяли 5,75 т содової сировини, що містить 95 %  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  і 5 %  $\text{NaHCO}_3$ .

*Відповідь:*  $X_{\text{соди}} = 0,97$ ;  $\Phi_{\text{NaOH}} = 0,94$ .

### В. 3

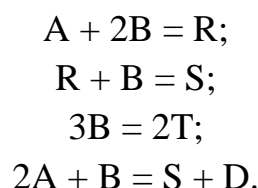
**3.1.** Негашене вапно містить 83,2 %  $\text{CaO}$ , 12 %  $\text{CO}_2$  і 4,8 % домішок. Його отримують випалюванням вапняка, що містить 89 %  $\text{CaCO}_3$ .  $\text{CO}_2$  у негашеному вапні утворюється через наявність у ньому карбонатів  $\text{CaCO}_3$ , кількість яких визначає ступінь випалювання вапняка. Визначити витратний коефіцієнт вапняка на 1 т вапна вказаного складу і ступінь випалювання вапняка.

*Відповідь:*  $K_{\text{техн. CaCO}_3} = 2,19$  т;  $X_{\text{CaCO}_3} = 0,766$ .

**3.2.** Азотну кислоту концентрацією 58 % перед використанням на виробництві треба розвести водою до 46 %. Скільки треба взяти води, щоб отримати 2 000 кг розведеної кислоти?

*Відповідь:*  $G_{\text{H}_2\text{O}} = 414$  кг.

**3.3.** У реакторі ідеального змішування перебігають реакції:



Концентрації, кмоль/м<sup>3</sup>:  $C_{R_0} = C_{S_0} = C_{T_0} = C_{D_0} = 0$ ;  $C_{A_0} = 1$ ;  $C_A = 0,44$ ;  $C_R = 0,05$ ;  $C_S = 0,33$ ;  $C_T = 0,14$ . Об'ємна швидкість подачі вихідних речовин  $5 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/с. Визначте продуктивність за вихідною речовиною В та продуктом R.

*Відповідь:*  $P_{B_0} = 4,7$  моль/с;  $P_R = 1$  моль/с.

### В. 4

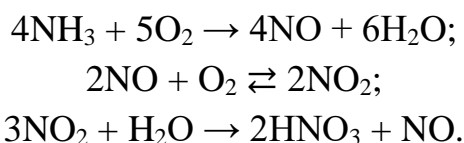
**4.1.** Розрахуйте витратний коефіцієнт колчедану, що містить 40 % S на 1 т  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , якщо втрати сірки і сірчистого ангідриду у виробництві сірчаної кислоти складають 3 %, а ступінь абсорбції – 99 %.

*Відповідь:*  $K_{\text{ЗК}} = 1,74$  т.

**4.2.** Вологість 300 кг вапна під час зберігання на повітрі змінилася з 2 до 5 % масових часток. Як за таких умов змінилася маса вапна?

*Відповідь:*  $\Delta G_{\text{вапна}} = 15,5$  кг.

**4.3.** Розрахуйте витратні коефіцієнти аміаку і повітря на 1 т 50 %-вої азотної кислоти за умови ступеня окислення аміаку до NO та NO до NO<sub>2</sub> 0,95 і ступеня абсорбції NO<sub>2</sub> 0,96. Синтез азотної кислоти здійснюється за реакціями:



*Відповідь:*  $K_{\text{ам}} = 308 \text{ м}^3$  або 233,8 кг;  $K_{\text{пов}} = 2 \text{ 530 м}^3$  або 3,28 т.

## **В. 5**

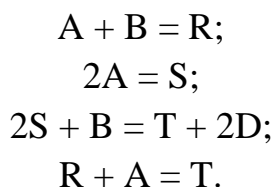
**5.1.** Розрахуйте витратні коефіцієнти вапна і коксу у виробництві 1 т технічного карбіду кальцію  $\text{CaO} + 3\text{C} = \text{CaC}_2 + \text{CO}$ . Технічний карбід кальцію має такий склад: 78 %  $\text{CaC}_2$ , 15 %  $\text{CaO}$ , 3 % C, інші домішки – 4 %. Вапно містить 96,5 %  $\text{CaO}$ . У коксі міститься 4 % золи, 4 % летючих домішок, 3 % вологи.

*Відповідь:*  $K_{\text{вапна}} = 862,8 \text{ кг}$ ;  $K_{\text{коксу}} = 526,8 \text{ кг}$ .

**5.2.** На виробництві наявні розчини кухонної солі з концентраціями 310 і 230 г/л. Які об'єми цих розчинів треба взяти, щоб отримати 250 л розчину з концентрацією 280 г/л?

*Відповідь:*  $G_1 = 156,25 \text{ л}$ ;  $G_2 = 93,75 \text{ л}$ .

**5.3.** У реакторі перебігають реакції:



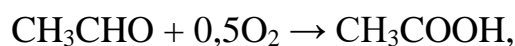
Визначте продуктивність реактора за речовинами R і S за таких умов:  $C_{\text{A}_0} = 2$ ;  $C_{\text{B}_0} = 1,7$ ;  $C_{\text{A}} = 0,1$ ;  $C_{\text{B}} = 0,5$ ;  $C_{\text{T}} = 0,15$ ;  $C_{\text{D}} = 0,05 \text{ кмоль/м}^3$ . Об'ємна витрата реакційної суміші  $1 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{с}$ . Початкові концентрації  $C_{\text{R}_0} = C_{\text{S}_0} = C_{\text{T}_0} = C_{\text{D}_0} = 0 \text{ кмоль/м}^3$ .

*Відповідь:*  $P_{\text{R}} = 11,75 \text{ моль/с}$ ;  $P_{\text{S}} = 3 \text{ моль/с}$ .

## **В. 6**

**6.1.** Розрахуйте витратний коефіцієнт технічного ацетальдегіду, що містить 98 % ацетальдегіду, для отримання 1 т оцтової кислоти у процесі його окислення за реакцією:





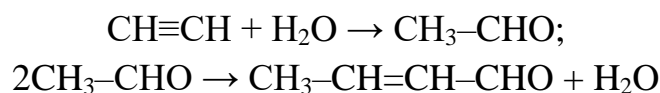
якщо вихід кислоти за альдегідом становить 89,3 %.

*Відповідь:*  $K_{\text{техн.ацд}} = 838$  кг.

**6.2.** Вологість 150 кг кам'яного вугілля під час зберігання на складі змінилася з 8,4 % до 3,9 % масових часток. Як змінилася маса вугілля?

*Відповідь:*  $\Delta G_{\text{вуг}} = -7$  кг.

**6.3.** Під час проведення двох послідовних реакцій першого порядку гідратації ацетилену і дегідратації ацетальдегіду:



з 1 моль ацетилену і 10 моль водяної пари отримано 0,4 моль ацетальдегіду і 0,025 моль кротонового альдегіду. Розрахуйте часткові ступені перетворення в обох реакціях, загальний ступінь перетворення ацетилену та вихід ацетальдегіду.

*Відповідь:*  $X_{\text{заг}} = 0,05$ ;  $X_1 = 0,4$ ;  $X_2 = 0,125$ ;  $\Phi_{\text{ацд}} = 0,4$ .

### ***Контрольні питання***

1. Дайте визначення витратного коефіцієнта. Як обчислюють витратні коефіцієнти?
2. Наведіть основні критерії оцінки ефективності хіміко-технологічного процесу.
3. Як розраховується ступінь перетворення необоротних та оборотних процесів?
4. Як розраховується вихід продукту в необоротних та оборотних процесах?
5. Чим відрізняється інтегральна і диференціальна селективність?
6. Що таке продуктивність і потужність?
7. Дайте визначення інтенсивності хіміко-технологічного процесу.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

### Ізотермічний процес у хімічному реакторі

**Мета роботи:** навчитися моделювати ізотермічні процеси у реакторах ідеального змішування і витіснення.

#### *Методика розрахунку*

#### Проточний реактор ідеального змішування (РІЗ-б)

У проточному реакторі вихідні речовини постійно подаються до реактора, а продукти відводяться з нього. Процес перебігає у стаціонарному стані. У режимі ідеального змішування хімічний склад, температура, тиск та інші параметри, що характеризують властивості реакційної маси, мають однакові значення в усіх точках реактора. Рівняння матеріального балансу для компоненти А у суміші має вигляд:

$$\begin{aligned} V_0 C_{A_0} - V_0 C_A &= W_A(C) \nu_p; \\ \text{або } (V_0 C_{A_0} - V_0 C_A) / \nu_p &= W_A(C). \end{aligned} \quad (3.1)$$

Якщо об'єм реакційної суміші не змінюється у результаті перебігу реакції, то рівняння (3.1) перетворюється на вигляд:

$$\begin{aligned} (C_A - C_{A_0}) / t &= W_A(C); \\ \text{або } C_{A_0} X_A / t &= -W_A(C), \end{aligned} \quad (3.2)$$

де  $C_A$  – концентрація компонента А у суміші;  $t$  – умовний час перебування у зоні реакції, що розраховується за формулою:

$$t = V_p / V_0. \quad (3.3)$$

Тут використовують об'єм суміші  $V_0$  за нормальних умов, тому умовний час реакції не співпадає з середнім часом перебування, який визначається рівнянням, подібним (3.3), але об'єм потоку береться за робочих умов.

У табл. 3.1 зведені розрахункові рівняння для реактора безперервної дії, що працює в режимі ідеального змішування під час проведення у ньому простих оборотних і необоротних, а також складних хімічних реакцій (різні види залежностей  $W_A(C)$ ), коли масова густина суміші залишається сталою. За умови інших кінетичних залежностей розв'язок рівняння (3.2) можливий графічно або з використанням ЕОМ.

Таблиця 3.1. Розрахункові рівняння для реактора ідеального змішування безперервної дії

| Реакція                                | Кінетична модель $W(C)$   | Розрахункові рівняння  |
|--|---|--|
| $A \rightarrow R$                      | $kC_A$  | $t = \frac{C_{A_0} - C_A}{kC_A} = \frac{X_A}{k(1 - X_A)}$ $C_A = \frac{C_{A_0}}{1 + kt}$ $X_A = \frac{kt}{1 + kt}$   |
| $A \rightarrow R$                      | $kC_A^n$<br>( $n \neq 1$ )  | $t = \frac{C_{A_0} - C_A}{kC_A^n} = \frac{X_A}{kC_{A_0}^{n-1}(1 - X_A)^n}$   |
| $A + B \rightarrow R$                  | $kC_A C_B$<br>( $C_{B_0}/C_{A_0} = b$ ,<br>$C_{A_0} \neq C_{B_0}$ ) | $t = \frac{C_{A_0} - C_A}{kC_A (C_{B_0} - C_{A_0} + C_A)}$ $t = \frac{X_A}{kC_{A_0} (1 - X_A)(b - X_A)}$   |
| $A \rightleftharpoons R$               | $kC_A - k'C_A$<br>( $C_{R_0} = 0$ )                                 | $t = \frac{C_{A_0} - C_A}{kC_{A_0} - k'(C_{B_0} - C_A)}$ $t = \frac{X_A}{k - (k + k')X_A}$ $X_A = \frac{kt}{1 + (k + k')t}$  |
| $A \rightarrow R \rightarrow S$        | $k_1 C_A$<br>$k_1 C_A - k_2 C_R$<br>$k_2 C_R$                       | $t = \frac{C_{A_0} - C_A}{kC_A} = \frac{X_A}{k(1 - X_A)}$ $C_A = \frac{C_{A_0}}{1 + kt}$ $X_A = \frac{kt}{1 + kt}$ $C_R = \frac{k_1 t C_{A_0}}{(1 + k_1 t)(1 + k_2 t)}$ $C_S = \frac{k_1 t^2 C_{A_0}}{(1 + k_1 t)(1 + k_2 t)}$ $t_{R,max} = \frac{1}{\sqrt{k_1 k_2}}$  |
| $A \rightarrow R$<br>$A \rightarrow S$ | $(k_1 + k_2)C_A$  | $t = \frac{C_{A_0} - C_A}{(k_1 + k_2)C_A}$ $t = \frac{X_A}{(k_1 + k_2)(1 - X_A)}$ $C_A = \frac{C_{A_0}}{1 + (k_1 + k_2)t}$ $X_A = \frac{(k_1 + k_2)t}{1 + (k_1 + k_2)t}$ $C_R = \frac{k_1 t C_{A_0}}{1 + (k_1 + k_2)t}$ $C_S = \frac{k_2 t C_{A_0}}{1 + (k_1 + k_2)t}$ |

### Реактор ідеального витіснення (РІВ)

Реакційна суміш рухається у режимі ідеального витіснення, якщо швидкості всіх елементів суміші у довільному перерізі реактора рівні між собою (поршневий режим), тобто відсутнє осьове перемішування, а радіальне перемішування вважається ідеальним.

Рівняння матеріального балансу для моделі ідеального витіснення має вигляд

$$dN_A/dV_p = W_A, \text{ за } V_p = 0 \quad N_A = N_{A_0}. \quad (3.4)$$

Якщо об'ємна витрата реакційної суміші  $V_0$  – величина стала, то

$$dC_A/dt = W_A, \text{ за } t = 0 \quad C_A = C_{A_0}. \quad (3.5)$$

Диференціальне рівняння (3.5) з початковою умовою  $t = 0$  для деяких видів простих хімічних реакцій має аналітичний розв'язок. У табл. 3.2 наведені розв'язки рівняння (3.5) як розрахункові формули для реактора, що працює в режимі ідеального витіснення під час проведення у ньому необоротних хімічних реакцій, коли реакційний об'єм залишається у процесі реакції сталим.

Таблиця 3.2. Розрахункові рівняння для реактора ідеального витіснення

| Реакція                                | Кінетична модель $W(C)$  | Розрахункові рівняння   |
|--|--|---|
| $A \rightarrow R$                      | $kC_A$   | $t = \frac{1}{k} \ln \frac{C_{A_0}}{C_A} = \frac{1}{k} \ln \frac{1}{1-X_A}$<br>$C_A = C_{A_0} \exp(-kt)$<br>$X_A = 1 - \exp(-kt)$   |
| $A \rightarrow R$                      | $kC_A^n$<br>( $n \neq 1$ )   | $t = \frac{C_{A_0}^{1-n} - C_A^{1-n}}{k(n-1)} = \frac{C_{A_0}^{1-n}}{k(n-1)} [(1-X_A)^{1-n} - 1]$   |
| $A + B \rightarrow R$                  | $kC_A C_B$<br>( $C_{B_0}/C_{A_0} = b,$<br>$C_{A_0} \neq C_{B_0}$ ) | $t = \frac{1}{k(C_{B_0} - C_{A_0})} \ln \frac{C_B C_{A_0}}{C_A C_{B_0}}$<br>$t = \frac{1}{kC_A (b-1)} \ln \frac{b(1-X_A)}{b - X_A}$   |
| $A \rightleftharpoons R$               | $kC_A - k'C_R$<br>( $C_{R_0} \neq 0$ )                             | $C_A = \frac{k_1}{k_1 + k'} C_{A_0} \left\{ \frac{k_1}{k'} + \exp[-(k + k')t] \right\}$<br>$X_A = \frac{k_1}{k_1 + k'} \{1 - \exp[-(k + k')t]\}$  |
| $A \rightarrow R \rightarrow S$        | $k_1 C_A$<br>$k_1 C_A - k_2 C_R$<br>$k_2 C_R$                      | $t = \frac{1}{k} \ln \frac{C_{A_0}}{C_A} = \frac{1}{k} \ln \frac{1}{1-X_A}$<br>$C_A = C_{A_0} \exp(-kt); X_A = 1 - \exp(-kt)$<br>$C_R = \frac{k_1}{k_2 - k_1} C_{A_0} \{ \exp[-(k_1 - k_2)t] \}$<br>$t_{R,max} = \frac{\ln k_1/k_2}{k_1 - k_2}$ |
| $A \rightarrow R$<br>$A \rightarrow S$ | $(k_1 + k_2)C_A$   | $t = \frac{1}{k_1 + k_2} \ln \frac{C_{A_0}}{C_A} = \frac{1}{k_1 + k_2} \ln \frac{1}{1-X_A}$<br>$C_A = C_{A_0} \exp[-(k_1 + k_2)t]$<br>$X_A = 1 - \exp[-(k_1 + k_2)t]$<br>$C_R = \frac{k_1}{k_1 + k_2} C_{A_0} \{1 - \exp[-(k_1 + k_2)t]\}$      |

## Реактор ідеального змішування періодичної дії (РІЗ-п)

Реактори цього типу складаються з резервуару і змішувального пристрою, де компоненти суміші можуть добре перемішуватись і реагувати між собою протягом певного періоду часу. Очевидно, що процес, що в ньому перебігає – нестационарний, і рівняння матеріального балансу має вигляд:

$$dN_A/v_p dt = W_A, \text{ за } t = 0 \ N_A = N_{A_0}. \quad (3.6)$$

Якщо об'єм реакційної суміші у процесі реакції залишається сталим, то рівняння (3.6) перетворюється на вигляд:

$$dC_A/dt = W_A, \text{ за } t = 0 \ C_A = C_{A_0}. \quad (3.7)$$

Формули у табл. 3.2 можна використовувати під час розрахунків реакторів періодичної дії.

### Приклади

**П. 1.** Процес описується реакцією типу  $A \rightarrow 2R$  з константою швидкості, що дорівнює  $0,24 \text{ хв}^{-1}$ . Заданий ступінь перетворення речовини А становить  $0,8$ , вихідна концентрація речовини А –  $1,8 \text{ кмоль/м}^3$ , продуктивність реактора за продуктом R –  $5,8 \text{ кмоль/год}$ . Визначте потрібний об'єм реактора змішування і об'ємну витрату вихідної суміші.

#### Розв'язання

|                                  |   |
|----------------------------------|---|
| Дано:                            | $A \rightarrow 2R.$   |
| $k = 0,24 \text{ хв}^{-1}$       | За визначенням:   |
| $X_A = 0,8$                      | $V_0 = V_p/t$ , тоді $V_p = V_0 t$ .  |
| $C_{A0} = 1,8 \text{ кмоль/м}^3$ | За визначенням та з урахуванням стехіометричних коефі-                                    |
| $P_R = 5,8 \text{ кмоль/год}$    | цієнтів:  |
| $V_p - ?$                        | $P_R = 2V_0 C_A = 2V_0 C_{A_0} X_A$ , тоді  |
| $V_0 - ?$                        | $V_0 = P_R / 2C_{A_0} X_A = 5,8 / 2 \cdot 1,8 \cdot 0,8 = 2 \text{ м}^3/\text{год}$ .     |
|                                  | За формулою з таблиці 3.1:  |
|                                  | $t = X_A / k(1 - X_A) = 0,8 / 0,24 \cdot 0,2 = 16,7 \text{ хв}$ або $0,278 \text{ год}$ ; |
|                                  | $V_p = 2 \cdot 0,278 = 0,556 \text{ м}^3$ або $556 \text{ л}$ .                           |

*Відповідь:*  $V_0 = 2 \text{ м}^3/\text{год}$ ;  $V_p = 556 \text{ л}$ .

**П. 2.** Визначте об'єм реактора ідеального витіснення для здійснення процесу, якому відповідає реакція  $A \rightarrow R + S$  першого порядку. Витрата речовини А складає  $5,03 \cdot 10^{-4} \text{ кмоль/с}$ , константа швидкості реакції дорівнює  $2,78 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ . Початкова концентрація речовини А –  $8,63 \cdot 10^{-2} \text{ кмоль/м}^3$ . Потрібний ступінь перетворення становить  $0,8$ .

*Розв'язання*

|   |  |
|---|--|
| Дано:   | $A \rightarrow R + S.$   |
| $P_{A_0} = 5,03 \cdot 10^{-4}$ кмоль/с              | За визначенням:  |
| $k = 2,78 \cdot 10^{-3}$ с <sup>-1</sup>            | $V_0 = V_p/t$ , тоді $V_p = V_0 t$ .   |
| $C_{A_0} = 8,63 \cdot 10^{-2}$ кмоль/м <sup>3</sup> | За формулою з таблиці 2:   |
| $X_A = 0,8$   | $t = 1/k \cdot \ln 1/(1 - X_A) = 1/2,78 \cdot 10^{-3} \cdot \ln 1/0,2 = 579$ с.  |
| $V_p - ?$   | За визначенням:  |
|   | $P_{A_0} = V_0 C_{A_0}$ , тоді $V_0 = P_{A_0}/C_{A_0} = 5,03 \cdot 10^{-4}/8,63 \cdot 10^{-2} = 5,85 \cdot 10^{-3}$ м <sup>3</sup> /с. |
|   | $V_p = 5,85 \cdot 10^{-3} \cdot 579 = 3,37$ м <sup>3</sup> .   |

*Відповідь:*  $V_p = 3,37$  м<sup>3</sup>.

**П. 3.** У безперервному реакторі ідеального змішування здійснюється рідкофазний процес, що описується послідовною реакцією  $A \rightarrow R \rightarrow S$ . Константи швидкості реакції першої стадії  $k_1 = 0,6$  год<sup>-1</sup>, другої стадії  $k_2 = 0,8$  год<sup>-1</sup>. Об'ємна витрата реакційної суміші дорівнює  $2,4$  м<sup>3</sup>/год. Вихідні концентрації речовин:  $C_{A_0} = 5$  моль/л,  $C_{R_0} = C_{S_0} = 0$ . Розрахуйте необхідний об'єм реактора для отримання максимального виходу цільового продукту R, ступінь перетворення вихідної речовини A, селективність і продуктивність за продуктом R.

*Розв'язок.*

|                                     |  |
|-------------------------------------|--|
| Дано:                               | $A \rightarrow R \rightarrow S.$   |
| $k_1 = 0,6$ год <sup>-1</sup>       | За визначенням:  |
| $k_2 = 0,8$ год <sup>-1</sup>       | $V_0 = V_p/t$ , тоді $V_p = V_0 t$ .   |
| $V_0 = 2,4$ м <sup>3</sup> /год     | За формулою з таблиці 1:   |
| $C_{A_0} = 5$ моль/л                | $t_{R_{max}} = \frac{1}{\sqrt{k_1 k_2}} = \frac{1}{\sqrt{0,6 \cdot 0,8}} = 1,44$ год;  |
| $C_{R_0} = C_{S_0} = 0$             | $V_p = 2,4 \cdot 1,44 = 3,46$ м <sup>3</sup> .   |
| $V_p$ (РІЗ-б) – ? ( $C_{R_{max}}$ ) | За визначенням:  |
| $X_A - ?$                           | $S_R = P_R/P_{A_0} X_A = P_R/C_{A_0} V_0 X_A.$   |
| $S_R - ?$                           | За визначенням:  |
| $P_R - ?$                           | $P_R = V_0 C_R.$   |
|                                     | За формулою з таблиці 1:   |
|                                     | $C_R = \frac{k_1 t C_{A_0}}{(1 + k_1 t)(1 + k_2 t)}$   |
|                                     | Оскільки $C_{A_0} = 5$ моль/л = 5 кмоль/м <sup>3</sup> , то:   |
|                                     | $P_R = \frac{V_0 k_1 t C_{A_0}}{(1 + k_1 t)(1 + k_2 t)} = \frac{2,4 \cdot 0,6 \cdot 1,44 \cdot 5}{(1 + 0,6 \cdot 1,44)(1 + 0,8 \cdot 1,44)} = 2,58$ кмоль/год. |

За формулою з таблиці 1:

$$X_A = k_1 t / (1 + k_1 t) = 0,6 \cdot 1,44 / (1 + 0,6 \cdot 1,44) = 0,464;$$

$$S_R = 2,58 / (5 \cdot 2,4 \cdot 0,464) = 0,463.$$

Відповідь:  $V_p = 3,46 \text{ м}^3$ ;  $X_A = 0,464$ ;  $S_R = 0,463$ ;  $P_R = 2,58 \text{ кмоль/год}$ .

**П. 4.** Рідкофазна оборотна реакція другого порядку  $2A \rightleftharpoons R + S$  має константу швидкості прямої реакції  $k_1 = 0,03 \text{ м}^3/(\text{кмоль} \cdot \text{с})$  і константу рівноваги  $K_p = 4$ . Об'ємна витрата речовини А з концентрацією  $C_{A_0} = 2 \text{ кмоль/м}^3$  дорівнює  $5,1 \text{ м}^3/\text{год}$ . Потрібний ступінь перетворення речовини А складає 85 % від рівноважного. Визначте необхідний об'єм реактора ідеального змішування для проведення цього процесу.

*Розв'язання*

Дано:

$$k_1 = 0,03 \text{ м}^3/(\text{кмоль} \cdot \text{с})$$

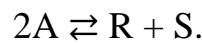
$$K_p = 4$$

$$C_{A_0} = 2 \text{ кмоль/м}^3$$

$$V_{A_0} = 5,1 \text{ м}^3/\text{год}$$

$$X_A = 85 \% X_{A,e}$$

$$V_{PI3} = ?$$



За визначенням константи рівноваги:

$$K_p = k_1/k_{-1};$$

$$k_{-1} = k_1/K_p = 0,03 / 4 = 7,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/(\text{кмоль} \cdot \text{с});$$

$$V_0 = V_p/t, \text{ тоді } V_{PI3} = V_0 t.$$

Оскільки наведена складна реакція має другий порядок, то користуватися даними таблиці 1 для першого порядку не можна. Тоді виразимо кінетичне рівняння реакції:

$$U_A = -\frac{dC}{dt} = \frac{C_A - C_{A_0}}{t} =$$

$$= -k_1 C_{A_0}^2 (1 - X_A)^2 + k_{-1} C_R C_S.$$

За рівнянням хімічної реакції:

$$C_R = C_S = \frac{1}{2} C_{A_0} X_A.$$

Виразимо з кінетичного рівняння час і підставимо значення концентрацій  $C_R$  і  $C_S$ :

$$t = \frac{C_A - C_{A_0}}{-k_1 C_{A_0}^2 (1 - X_A)^2 + \frac{1}{4} k_{-1} C_{A_0}^2 X_A^2 - C_{A_0} X_A} =$$

$$= \frac{-C_{A_0} X_A}{-C_{A_0} (k_1 C_{A_0} (1 - X_A)^2 - \frac{1}{4} k_{-1} C_{A_0} X_A^2)} =$$

$$= \frac{X_A}{k_1 C_{A_0} (1 - X_A)^2 - \frac{1}{4} k_{-1} C_{A_0} X_A^2}.$$

За визначенням концентраційної константи рівноваги:

$$K_p = \frac{C_{R,e} C_{S,e}}{C_{A,e}^2} = \frac{\left(\frac{1}{2} C_{A_0} X_{A,e}\right)^2}{C_{A_0}^2 (1 - X_{A,e})^2} = \frac{X_{A,e}^2}{4(1 - X_{A,e})^2} = 4.$$

Після ряду перетворень одержимо квадратне рівняння:

$$X_{A,e}^2 = 16(1 - X_{A,e})^2;$$

$$X_{A,e}^2 = 16(1 - 2X_{A,e} + X_{A,e}^2);$$

$$X_{A,e}^2 = 16 - 32X_{A,e} + 16X_{A,e}^2;$$

$$15X_{A,e}^2 - 32X_{A,e} + 16 = 0;$$

$$D = 32^2 - 4 \cdot 15 \cdot 16 = 64;$$

$$\sqrt{D} = 8:$$

$$1) \quad X_{A,e} = (32 + 8) / 30 = 1,333 - \text{неможливо};$$

$$2) \quad X_{A,e} = (32 - 8) / 30 = 0,8;$$

$$X_A = 0,85 \cdot X_{A,e} = 0,85 \cdot 0,8 = 0,68.$$

Підставляємо одержане значення  $X_A$  і відомі константи швидкості в отриманий вираз для часу:

$$t = \frac{0,68}{0,03 \cdot 2 \cdot (1 - 0,68)^2 - \frac{1}{4} \cdot 7,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,68^2} =$$

$$= 154 \text{ с або } 0,0427 \text{ год.}$$

Остаточо знаходимо об'єм РІЗ:

$$V_{\text{РІЗ}} = 5,1 \cdot 0,0427 = 0,218 \text{ м}^3 \text{ або } 218 \text{ л.}$$

*Відповідь:*  $V_{\text{РІЗ}} = 218 \text{ л.}$

### *Задачі для самостійної роботи*

#### **В. 1**

**1.1.** Проводять рідкофазну реакцію першого порядку  $A \rightarrow R$  з константою швидкості  $0,45 \text{ хв}^{-1}$ . Об'ємна витрата реагенту становить  $30 \text{ л/хв}$ . Порівняйте ступінь перетворення речовини  $A$ , що досягається у реакторі змішування і витіснення об'ємом  $150 \text{ л}$  кожний.

*Відповідь:*  $X_{A(\text{РІВ})} / X_{A(\text{РІЗ-б})} = 1,29.$

**1.2.** Рідкофазна оборотна реакція  $2A \rightleftharpoons R$  проводиться у РІЗ-б об'ємом  $2,6 \text{ м}^3$ . Константа швидкості прямої реакції  $k_1 = 31,4 \text{ м}^3/(\text{кмоль} \cdot \text{хв})$ , зворотної –  $k_2 = 2 \text{ хв}^{-1}$ . Концентрація вихідної речовини  $0,9 \text{ моль/л}$ . Потрібний ступінь перетворення  $X_A = 0,8$ . Визначте продуктивність реактора за продуктом  $R$ .

*Відповідь:*  $P_R = 23,2 \text{ кмоль/год.}$

#### **В. 2**

**2.1.** Рідкофазний процес описується простою реакцією першого порядку  $A \rightarrow R$  з константою швидкості  $0,12 \text{ хв}^{-1}$ . Концентрація речовини  $A$  у вихідному потоці дорівнює  $3 \text{ кмоль/м}^3$ , потрібний ступінь перетворення речовини  $A - 0,85$ . Визначте, яку кількість речовини  $A$  можна переробити за  $1 \text{ год}$  в реакторі ідеального змішування об'ємом  $0,8 \text{ м}^3$ .

*Відповідь:*  $P_{A_0} = 3,05 \text{ кмоль/год.}$



**2.2.** Рідкофазний процес описується складною послідовною реакцією типу  $A \rightarrow R \rightarrow S$ . Константи швидкості реакцій  $k_1 = 5 \text{ с}^{-1}$ ,  $k_2 = 0,8 \text{ с}^{-1}$ . Вихідна концентрація речовини А дорівнює 1,8 моль/л. Об'ємна витрата речовини А становить 18 м<sup>3</sup>/год. Розрахувати об'єм реактора змішування для отримання максимальної кількості продукту R, селективність і продуктивність за продуктом R.

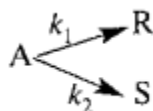
*Відповідь:*  $V_p = 2,5 \text{ л}$ ;  $S_R = 0,715$ ;  $P_R = 16,53 \text{ кмоль/год}$ .

### В. 3

**3.1.** У реакторі перебігає реакція другого порядку  $2A \rightarrow R$  з константою швидкості 0,28 л/(моль·с). Початкова концентрація речовини А на вході у реактор дорівнює 0,85 моль/л, ступінь перетворення речовини А – 0,9. Визначте, яку кількість речовини А можна переробити у РІЗ-б об'ємом 2 м<sup>3</sup> і у РІВ об'ємом 0,6 м<sup>3</sup>.

*Відповідь:*  $P_{A_0(\text{РІЗ-б})} = 16,15 \text{ кмоль/год}$ ;  $P_{A_0(\text{РІВ})} = 46,37 \text{ кмоль/год}$ .

**3.2.** Процес описується паралельною реакцією типу:



з константами швидкості  $k_1 = 0,18 \text{ л/(моль·хв)}$  і  $k_2 = 0,06 \text{ л/(моль·хв)}$ . Об'ємний потік речовини А дорівнює 250 л/хв. Процес проводиться у реакторі змішування об'ємом 250 л. Концентрація речовини R на виході з реактора дорівнює 1,2 моль/л. Визначте концентрацію речовини А на вході у реактор і ступінь перетворення речовини А.

*Відповідь:*  $C_{A_0} = 8,27 \text{ моль/л}$ ;  $X_A = 0,193$ .

### В. 4

**4.1.** У рідкофазному процесі перебігає реакція другого порядку  $2A \rightarrow R$  з константою швидкості 2,3 л/(моль·хв). Об'ємна витрата суміші з концентрацією вихідного реагенту  $C_{A_0} = 0,5 \text{ кмоль/м}^3$  дорівнює 3,6 м<sup>3</sup>/год. Визначте продуктивність РІЗ-б об'ємом 0,4 м<sup>3</sup> за продуктом R. Розрахуйте об'єм РІВ для отриманої продуктивності.

*Відповідь:*  $P_R = 0,63 \text{ кмоль/год}$ ;  $V_p = 121,8 \text{ л}$ .

**4.2.** Рідкофазна оборотна реакція другого порядку  $2A \rightleftharpoons R + S$  має константу швидкості прямої реакції  $k_1 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/(\text{кмоль} \cdot \text{с})$  і константу рівноваги  $K_p = 9$ . Об'ємна витрата речовини А з концентрацією  $C_{A_0} = 1,5 \text{ кмоль/м}^3$  дорівнює 4,8 м<sup>3</sup>/год. Потрібний ступінь перетворення речовини А становить 80 % від рівноважного. Визначте необхідний об'єм реактора ідеального змішування для проведення цього процесу.

*Відповідь:*  $V_p = 3,36 \text{ м}^3$ .

## В. 5

**5.1.** Рідкофазна реакція  $2A \rightarrow R$  з константою швидкості  $0,4 \text{ хв}^{-1}$  проводиться у реакторі ідеального змішування об'ємом  $0,5 \text{ м}^3$ . Об'ємна витрата речовини А становить  $20 \text{ л/хв}$ . Визначте, якого ступеня перетворення можна досягти у цих умовах за умови початкової концентрації речовини А  $0,71 \text{ кмоль/м}^3$ , розрахуйте об'єм реактора ідеального витіснення для досягнення того самого ступеня перетворення і продуктивність за продуктом R.

*Відповідь:*  $X_A = 0,689$ ;  $V_{\text{P(В)}} = 156 \text{ л}$ ;  $P_R = 0,294 \text{ кмоль/год}$ .

**5.2.** Процес описується паралельною реакцією типу:



з константами швидкості  $k_1 = 0,28 \text{ л/(моль} \cdot \text{хв)}$  і  $k_2 = 0,12 \text{ л/(моль} \cdot \text{хв)}$ . Об'ємний потік із концентрацією речовини А  $1,6 \text{ моль/м}^3$  дорівнює  $100 \text{ л/хв}$ . Визначте об'єм реактора змішування і досяжний ступінь перетворення речовини А за умови, що продуктивність за продуктом R становить  $4,8 \text{ кмоль/год}$ .

*Відповідь:*  $V_p = 1 \text{ 350 л}$ ;  $X_A = 0,7$ .

## В. 6

**6.1.** Рідкофазна реакція  $2A \rightarrow R + S$  має константу швидкості  $0,38 \text{ л/(моль} \cdot \text{хв)}$ . Об'ємна витрата вихідної речовини А з концентрацією  $C_{A_0} = 0,4 \text{ моль/л}$  становить  $40 \text{ л/хв}$ . Визначте об'єми реакторів РІЗ-б і РІВ під час проведення процесу до ступенів перетворення  $0,3$ ;  $0,5$ ;  $0,7$ ;  $0,9$ .

*Відповідь:*  $X_A = 0,3$ :  $V_{\text{РІЗ-б}} = 161 \text{ л}$ ;  $V_{\text{РІВ}} = 113 \text{ л}$ ;

$X_A = 0,5$ :  $V_{\text{РІЗ-б}} = 526 \text{ л}$ ;  $V_{\text{РІВ}} = 263 \text{ л}$ ;

$X_A = 0,7$ :  $V_{\text{РІЗ-б}} = 2 \text{ 047 л}$ ;  $V_{\text{РІВ}} = 614 \text{ л}$ ;

$X_A = 0,9$ :  $V_{\text{РІЗ-б}} = 23 \text{ 684 л}$ ;  $V_{\text{РІВ}} = 2 \text{ 368 л}$ .

**6.2.** Рідкофазний процес описується складною реакцією типу  $A \rightarrow R \rightarrow S$  з константами швидкості  $k_1 = 5 \text{ хв}^{-1}$  і  $k_2 = 1,8 \text{ хв}^{-1}$ . Вихідна концентрація речовини А дорівнює  $4,8 \text{ моль/л}$ . Об'ємна витрата суміші становить  $18 \text{ м}^3/\text{год}$ . Розрахувати об'єм реактора змішування для отримання максимальної кількості продукту R, селективність і продуктивність за продуктом R.

*Відповідь:*  $V_p = 0,1 \text{ м}^3$ ;  $S_R = 0,627$ ;  $P_R = 33,75 \text{ кмоль/год}$ .

### *Контрольні питання*

1. Який технологічний режим установлюється у проточному реакторі ідеального змішування?
2. Опишіть режим роботи реактора ідеального витіснення.
3. У чому полягають особливості реактора ідеального змішування періодичної дії?
4. Що характеризує ступінь перетворення?
5. Опишіть кінетичну модель оборотної, послідовної і паралельної реакцій.
6. Дайте визначення селективності, продуктивності та потужності.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

### Визначення вмісту іонів кальцію і магнію у воді

**Мета роботи:** навчитися визначати твердість водопровідної води за вмістом іонів кальцію і магнію.

**Обладнання:** бюретки об'ємом 25 мл; піпетки Мора об'ємом 50 і 100 мл; конічні колби для титрування об'ємом 250 мл; мірний циліндр об'ємом 50 мл.

**Реактиви:** 0,05 М розчин трилону Б; 0,1 М розчин гідроксиду натрію; аміачний буферний розчин з рН = 9,8; індикатор еріохром чорний Т в суміші з NaCl (1 : 100); мурексид, індикаторна суміш.

#### *Теоретична частина*

Вода є обов'язковим елементом будь-якого хімічного виробництва. Її використовують як розчинник, холодоагент або теплоносіє, транспортну речовину, екстрагент. У деяких видах виробництва вода виступає як сировина (зокрема у процесах гідратації).

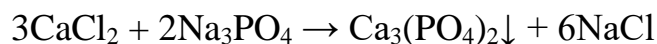
У природній воді завжди містяться розчинені речовини і механічні домішки. Тому залежно від призначення застосовують різноманітні методи очистки води.

Однією з найважливіших характеристик води є твердість, яка зумовлена вмістом розчинених солей кальцію і магнію. Розрізняють тимчасову (карбонатну) твердість, яка зумовлена наявністю гідрокарбонатів кальцію і магнію, та постійну твердість, яку викликають сульфати, хлориди і нітрати кальцію і магнію. Сума тимчасової і постійної твердості дає загальну твердість. Твердість води виражається, згідно з ДСТУ ISO 6059:2003, у розмірності ммоль/л. Воду поділяють на дуже м'яку (сумарний вміст солей Ca<sup>2+</sup> та Mg<sup>2+</sup> менше ніж 1,5 ммоль/л), м'яку (1,5–3 ммоль/л), помірно тверду (3–6 ммоль/л), тверду (6–9 ммоль/л) і дуже тверду (>9 ммоль/л).

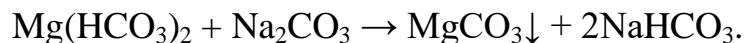
Тимчасова твердість, на відміну від постійної, може бути усунена кип'ятінням води, що супроводжується перетворенням гідрокарбонатів кальцію і магнію на нерозчинні карбонати:



У промисловому процесі усунення твердості води (пом'якшення) здійснюють фізичними або хімічними способами. До фізичних способів належать дистиляція, виморожування, термообробка. Хімічні способи полягають в обробці води хімічними реагентами з метою зв'язування катіонів кальцію і магнію у нерозчинні сполуки. Серед хімічних способів пом'якшення води найбільш поширені фосфатний:



і содовий:



До того ж для усунення твердості води широко застосовують метод іонного обміну.

Визначення твердості води для промислових потреб, так само, як і стічних вод виробництва, здійснюють зазвичай титриметричним методом у присутності індикаторів.

### **Порядок виконання роботи**

Аліквотну частину розчину об'ємом 50 мл відбирають піпеткою в колбу для титрування, додають до неї 10 мл розчину NaOH, 0,1 г індикаторної суміші мурексиду і повільно за умови перемішування титрують стандартним розчином трилону Б до переходу рожевого забарвлення у фіолетове (рис. 4.1). Відмічають об'єм титранту ( $V_1$ ) за бюреткою, який пішов на титрування катіонів кальцію.

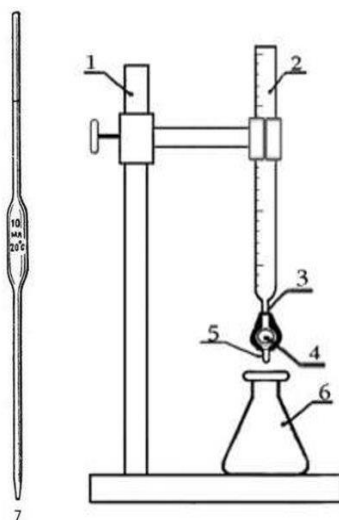


Рис. 4.1. Установка для титрування (1 – штатив; 2 – бюретка; 3 – гумова трубка; 4 – кулька; 5 – скляний носик; 6 – колба для титрування; 7 – піпетка Мора)

Після цього знову відмірюють мірною піпеткою в іншу колбу для титрування об'єм аліквоти досліджуваного розчину, додають 25 мл аміачного буферного розчину, 0,1 г індикатору еріохрому чорного Т в суміші з NaCl (1 : 100) і повільно за умови перемішування титрують розчином трилону Б до переходу забарвлення розчину в синій колір.

Відмічають об'єм трилону Б ( $V_2$ ), який використано на титрування іонів  $\text{Ca}^{2+}$  та  $\text{Mg}^{2+}$  в суміші. За різницею об'ємів ( $V_2 - V_1$ ) визначають об'єм розчину трилону Б ( $V$ ), витрачений на титрування іонів  $\text{Mg}^{2+}$ . Титрування проводять тричі. За отриманими результатами розраховують концентрацію іонів  $\text{Ca}^{2+}$  та  $\text{Mg}^{2+}$  у досліджуваній воді.

### **Обробка результатів**

Концентрацію іонів кальцію ( $C_{\text{Ca}^{2+}}$ ) у ммоль/л визначають за формулою:

$$C_{\text{Ca}^{2+}} = \frac{V_{\text{Ca}^{2+}} \cdot C_T}{V_{\text{алікв}} \cdot 40,078} \cdot 1000, \quad (4.1)$$

- де  $V_{\text{Ca}^{2+}}$  – об'єм розчину трилону Б, витрачений на титрування  $\text{Ca}^{2+}$ , мл;  
 $C_T$  – концентрація розчину трилону Б, моль/л;  
 $V_{\text{алікв}}$  – об'єм аліквоти, мл;  
 40,078 – атомна маса кальцію, а. о. м.;  
 1 000 – коефіцієнт для переходу від грамів до міліграмів.

Концентрацію іонів магнію ( $C_{\text{Mg}^{2+}}$ ) в ммоль/л визначають за формулою:

$$C_{\text{Mg}^{2+}} = \frac{(V_T - V_{\text{Ca}^{2+}}) \cdot C_T}{V_{\text{алікв}} \cdot 24,305} \cdot 1000, \quad (4.2)$$

- де  $V_T$  – загальний об'єм розчину трилону Б, витрачений на титрування іонів  $\text{Ca}^{2+}$  і  $\text{Mg}^{2+}$  в суміші, мл;  
 $V_{\text{Ca}^{2+}}$  – об'єм розчину трилону Б, витрачений на титрування  $\text{Ca}^{2+}$ , мл;  
 $C_T$  – концентрація розчину трилону Б, моль/л;  
 $V_{\text{алікв}}$  – об'єм аліквоти, мл;  
 24,305 – атомна маса магнію, а. о. м.;  
 1 000 – коефіцієнт для переходу від грамів до міліграмів.  
 Одержані значення твердості води порівнюють із нормативними.

### ***Контрольні питання***

1. Що таке твердість води? Які види твердості води існують?
2. Присутність яких солей зумовлює загальну, тимчасову й постійну твердість води?
3. Які методи існують для визначення загальної твердості води? Як визначають постійну твердість?
4. Назвіть методи пом'якшення води у промисловості.
5. Які індикатори використовують у комплексометричному методі визначення вмісту іонів кальцію і магнію у воді? На чому засноване їх використання?
6. У якому середовищі проводиться комплексометричне визначення загальної твердості води, чим це пояснюється? У чому полягає роль аміачно-буферної суміші?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

### Омилення і гідроліз

#### I. Отримання мила

**Мета роботи:** опанувати технологію отримання твердого мила з жиру рослинного походження.

**Обладнання:** порцеляновий стакан, хімічний стакан об'ємом 100 та 150 мл (2 шт.), скляні палички.

**Реактиви:** жир, гідроксид натрію, етиловий спирт, насичений розчин хлориду натрію ( $\rho = (1,16 - 1,18) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ )

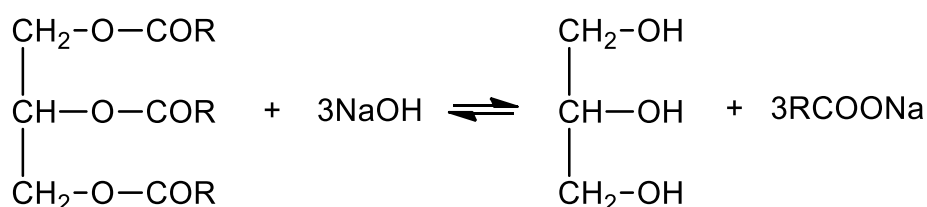
#### Теоретична частина

Сировиною для отримання звичайного мила, яке використовується в побуті під час прання і миття, слугують жири тваринного (тверді за консистенцією) або рослинного (рідкі) походження. Жири є складними ефірами гліцерину та вищих карбонових кислот. У склад тваринних жирів входять суміші насичених карбонових кислот (лаурилова  $\text{C}_{11}\text{H}_{23}\text{COOH}$ , пальмітинова  $\text{C}_{15}\text{H}_{31}\text{COOH}$ , стеаринова  $\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COOH}$ ), а у склад рослинних жирів – ненасичених (олеїнова  $\text{C}_{17}\text{H}_{33}\text{COOH}$ , гексадецинова  $\text{C}_{15}\text{H}_{29}\text{COOH}$ , лінолева  $\text{C}_{17}\text{H}_{29}\text{COOH}$ ).

Оскільки наразі основною сировиною для отримання мила є рослинні жири, їх попередньо гідрують воднем у присутності каталізатора (наприклад, нікелю) і отримують тверді жири, що називаються саломолом. Отримання мила проводять у декілька стадій:

- 1) гідроліз, розщеплення жирів водяним паром в автоклавах за температури 523–573 К і тиску  $25 \cdot 10^5$  і  $30 \cdot 10^5$  Па;
- 2) очищення отриманих жирних кислот;
- 3) омилення кислот гідроксидом натрію або калію (або кальцинованою содою).

Схематично отримання мила можна виразити реакцією:



де  $\text{R} = \text{C}_{11}\text{H}_{23}$ ;  $\text{C}_{15}\text{H}_{31}$ ;  $\text{C}_{17}\text{H}_{31}$  та ін.

Натрієві або калієві солі вищих жирних кислот є жировим звичайним милом. Натрієве мило тверде, калієве – рідке. Сорт мила залежить від складу в ньому жирних кислот, який виражається у відсотках. У промисловості випускають 72 %-,



70 %- і 60 %-ве мило. У високоякісне господарське і туалетне мило додають барвники та віддушки.

### **Порядок виконання роботи**

Гідроліз жирів здійснюють спиртовим розчином гідроксиду натрію. Для цього зважують 6 г жиру, переносять у порцеляновий стакан і нагрівають на водяній бані до розплавлення. Готують розчин NaOH шляхом розчинення 2,5 г NaOH у 6 мл H<sub>2</sub>O і 15 мл C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH. Спиртовий розчин NaOH доливають під час перемішування до розплавленого жиру. Отриманий розчин кип'ятять протягом 10–15 хв, додають до нього розчин NaCl, приготованого з 15 мл води та 5,4 г NaCl, і охолоджують у бані з водою.

Утворений на поверхні шар мила дістають зі стакана, ретельно висушують фільтрувальним папером і зважують. Окремо зважують стакан з маточним розчином і визначають масу залишкової води з розчиненими у ній надлишком NaOH, етанолом і NaCl.

Після закінчення роботи розраховують вихід мила на взятий жир згідно з рівнянням реакції і складають матеріальний баланс (табл. 5.1). Під час розрахунку матеріального балансу варто вважати, що жир у реакції витрачається повністю, а весь гліцерин, що утворюється в реакції, сорбується на осаді мила.

Таблиця 5.1. Матеріальний баланс процесу одержання мила

| Прибуток                         |   |   | Витрата                          |   |   |
|----------------------------------|---|---|----------------------------------|---|---|
| Речовина                         | г | % | Речовина                         | г | % |
| Жир                              |   |   | Мило, зокрема:                   |   |   |
| NaOH                             |   |   | RCOONa                           |   |   |
| C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH |   |   | Гліцерин                         |   |   |
| NaCl                             |   |   | H <sub>2</sub> O                 |   |   |
| H <sub>2</sub> O                 |   |   | Маточний розчин, зокрема:        |   |   |
|                                  |   |   | NaOH                             |   |   |
|                                  |   |   | C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH |   |   |
|                                  |   |   | NaCl                             |   |   |
|                                  |   |   | H <sub>2</sub> O                 |   |   |
|                                  |   |   | Втрати                           |   |   |
| Всього                           |   |   | Всього                           |   |   |

## II. Визначення вмісту жирних кислот в милі

**Мета роботи:** опанувати методику визначення вмісту жирних кислот (якісного числа) у господарському або туалетному милі.

**Обладнання:** електроплита, хімічний стакан, скляна паличка.

**Реактиви:** туалетне або господарське мило, хлоридна кислота.

### *Теоретична частина*

Відповідно до ДСТУ ISO 685:2004, експертиза якості туалетного мила виконується за органолептичними та фізико-хімічними показниками з використанням інструментальних вимірювальних методів.

До органолептичних показників якості мила належать зовнішній вигляд, форма, колір і запах, відповідність пакування та маркування нормативним вимогам.

Фізико-хімічні показники якості мила – це якісне число, вміст хлориду натрію, содопродуктів, титр мила, здатність до піноутворення.

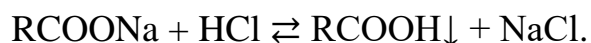
Якісне число мила – це масова частка жирних кислот у перерахунку на номінальну масу шматка у 100 г. Для групи «Екстра» якісне число становить не менше ніж 78 г, для групи «Дитяче», «I» та «II» – не менше ніж 74 г. Для рідких туалетних мил вміст жирних кислот визначається також у відсотках і повинен бути в межах 16,0–21,0 %.

У туалетних милах не допускається великий залишок вільного лугу (не більше ніж 0,05 %) і неомиленого жиру (не більш ніж 0,2 %) для твердого мила. Для рідких мил цей показник — не більше ніж 1,5 %.

Титр мила (титр жирних кислот) – це температура застигання жирних кислот, виділених із мила. Він характеризує правильність підбору складу жирової суміші мила. Якість мила, його твердість, розчинність, стиранність, піноутворення, утримання початкових властивостей під час довготривалого зберігання значною мірою визначаються складом жирової суміші, підібраної для мила. Титр жирних кислот жирової суміші туалетних мил повинен бути в межах 36–41 °С. Мило з нижчим титром є недостатньо твердим і швидко витрачається, а за умови вищого титру знижується розчинність та мийна здатність.

### *Порядок виконання роботи*

В основі роботи лежить реакція гідролізу мила:



Зважують 5 г туалетного або господарського мила, нарізають його тонкими смужками і поміщають у стакан об'ємом 100 мл. Додають 50 мл дистильованої води і нагрівають на електроплиті до повного розчинення мила. До отриманого

розчину краплями додають 10 мл хлоридної кислоти (1 : 1), вставляють у стакан із розчином скляну паличку і продовжують нагрівати до утворення на поверхні маслянистого шару. Потім стакан охолоджують, витягають паличку та через отвір, який утворився, зливають рідину. Жирні кислоти, які залишились у стакані, переносять на фільтрувальний папір і висушують за кімнатної температури. Отримані жирні кислоти зважують і розраховують якісне число мила (ЯЧ, г/100 г мила) за формулою:

$$\text{ЯЧ} = \frac{m_{\text{жк}}}{m_{\text{мила}}} \cdot 100, \quad (5.1)$$

де  $m_{\text{жк}}$  – маса жирних кислот після гідролізу, г;  
 $m_{\text{мила}}$  – маса наважки мила, взятої для аналізу, г;  
100 – коефіцієнт для перерахунку на 100 г мила.

Визначають температуру топлення жирних кислот (титр мила). Порівнюють одержані значення якісного числа і титру мила з нормативними.

### ***Контрольні питання***

1. Які основні вимоги висуваються до жирової рецептури твердого і рідкого господарського мила?
2. Які жирні кислоти необхідні в жировому наборі твердого туалетного мила? У чому особливість еталонної рецептури туалетного мила?
3. Охарактеризуйте стадії виробництва мила.
4. На які групи розділяють показники якості мила? Назвіть основні показники.
5. Як розраховують якісне число і титр мила?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6

### Добування кофеїну з чаю

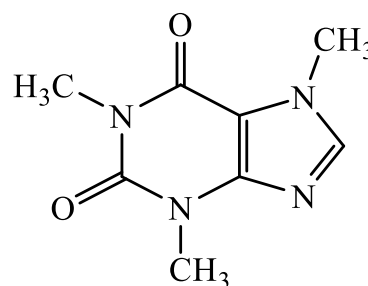
**Мета роботи:** опанувати технологію добування кофеїну з природної сировини.

**Обладнання:** порцелянова чашка, хімічні стакани об'ємом 150 мл, вата, фільтрувальний папір, скляні палички, ділительна воронка, штатив, електроплита, водяна баня.

**Реактиви:** чай (7 г), оксид магнію (3,5 г), хлороформ (60 мл), сірчана кислота (розв., 10 мл), натрій гідроксид (розв., 20 мл), пероксид водню, аміак.

#### Теоретична частина

Кофеїн (1,3,7-триметил-2,6-диоксипурин) – найбільш важлива похідна сполука пурину. Вміст його в листі чаю досягає 3 %, в зернах кави – 1,5 %. Кофеїн застосовується в медицині як засіб, що збуджує серцеву діяльність.



Кофеїн екстрагують із відходів чаю (чайний пил, обрізки листя і непридатні для харчових цілей листя чаю), кавових зерен. Залежно від хімічного складу чайного листа визначається виробничий метод отримання кофеїну. Склад чайного листа різноманітний. Крім алкалоїдів, у нього входять дубильні речовини (чайний танін) і пектинові речовини, які вилучаються екстракцією разом з алкалоїдами, а ще хлорофіл і супутні йому пігменти, глікозиди, смолисті речовини та невелика кількість ефірного масла.

Незважаючи на можливість одержання кофеїну з рослинної сировини, в низці країн пуринові алкалоїди виробляють синтетичним шляхом. Вихідним матеріалом у цьому разі зазвичай слугує сечова кислота, гуанін, ціаноцтова кислота та її естери.

#### Порядок виконання роботи

До тонко подрібненого чаю доливають суспензію магній оксиду (2 г MgO у 25 мл води), 75 мл води і кип'ятять 10–15 хв. Водний розчин фільтрують через ватний тампон. Кип'ятіння повторюють ще два рази з новими порціями води по 35 мл. Об'єднану водну витяжку підкислюють 5 мл розведеної сірчаної кислоти і концентрують у випарювальній чашці на водяній бані до однієї третини об'єму (рис. 6.1).

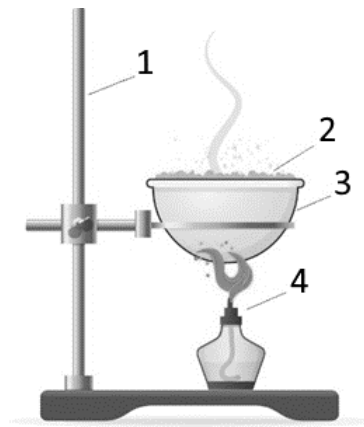


Рис. 6.1. Установа для випарювання

(1 – штатив; 2 – випарювана суміш; 3 – порцелянова чашка; 4 – спиртівка)

Гарячий розчин фільтрують через складчастий фільтр і витяжку двічі екстрагують хлороформом (рис. 6.2). На кожну екстракцію витрачають 15 мл розчинника. Хлороформову витяжку промивають спочатку 10 мл розведеного лугу, а потім такою самою кількістю води. Розчинник відганяють на водяній бані. Вихід продукту близько 0,1 г.

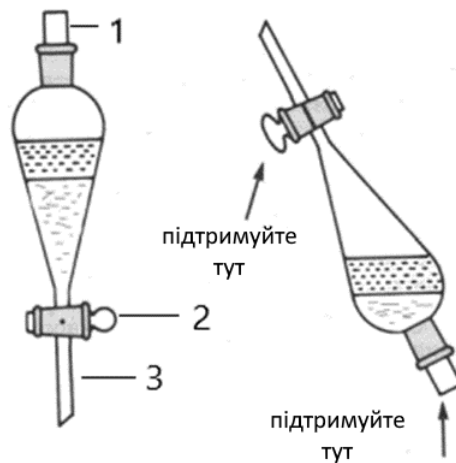


Рис. 6.2. Установа для екстракції (ділільна воронка)

(1 – пробка; 2 – поворотний кран; 3 – носик)

**Якісна реакція.** До 10 мг кофеїну доливають десять крапель 5 %-го гідроген пероксиду, одну краплю 25 %-вої соляної кислоти і випарюють на водяній бані. Зволожують осад невеликою кількістю водного розчину аміаку. З'являється пурпурове забарвлення, що зумовлено утворенням амонійної солі – тетраметилалоксантину.

### *Контрольні питання*

1. Які фізичні та хімічні властивості має кофеїн?
2. У яких природних джерелах міститься кофеїн?
3. У чому полягає метод екстракції?
4. Яку роль відіграє суспензія оксиду магнію у наведеній методиці?
5. Опишіть виконання якісної реакції на кофеїн.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 7

### Високотемпературні процеси

#### І. Одержання скла

**Мета роботи:** одержати легкоплавке скло із шихти заданого складу.

**Обладнання:** муфельна піч, порцелянова чашка або ступка, тигель, сито, дерев'яна дощечка або інша спеціальна форма для скла.

**Реактиви:** кварцовий пісок, борна кислота, сода або поташ, барвники: оксиди свинцю, оксиди заліза, кобальту, нікелю, міді чи марганцю.

#### Теоретична частина

Для одержання скла використовують оксиди або речовини, які утворюють оксиди за високих температур, що називаються склоутворювачами. До них належать кварцовий пісок  $\text{SiO}_2$ , сода  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , поташ  $\text{K}_2\text{CO}_3$ , сульфат натрію  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , вапняк  $\text{CaCO}_3$ , борна кислота  $\text{H}_3\text{BO}_3$ , бура  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ , свинцевий сурик  $\text{Pb}_3\text{O}_4$ , оксиди свинцю  $\text{PbO}_2$  і  $\text{PbO}$ . Також до складу шихти можуть входити знебарвлювачі, які видаляють слабке забарвлення скла (натрієва селітра, піролюзит), освітлювачі, які здатні видаляти гази під час варіння скла (оксид миш'яку (III), нітрат натрію), глушители, які роблять скло матовим чи молочним (оксиди і сірковмісні сполуки миш'яку, олова чи сурми), і барвники, які надають склу будь-якого забарвлення. Варіння скла проводять за температури від 1 000 до 1 500 °С, але, змінюючи склад шихти, можна отримати легкоплавке скло за температури 490–730 °С (табл. 7.1). Зазвичай до такого легкоплавкого скла належить свинцеве і боратне скло, які містять оксиди калію і натрію.



Таблиця 7.1. Вплив складу шихти на температуру топлення скла

| № з/п | Склад шихти |                               |                  | Т <sub>топл</sub> , °С |
|-------|-------------|-------------------------------|------------------|------------------------|
|       | PbO         | B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SiO <sub>2</sub> |                        |
| 1     | 84,5        | 11,0                          | 4,5              | 484                    |
| 2     | 86,0        | 10,6                          | 3,4              | 486                    |
| 3     | 87,5        | 11,4                          | 1,1              | 488                    |
| 4     | 75,0        | 15,0                          | 10,0             | 540                    |
| 5     | 92,7        | 7,3                           | –                | 565                    |
| 6     | 86,6        | 13,4                          | –                | 497                    |
| 7     | 93,7        | 6,3                           | –                | 560                    |
| 8     | 61,4        | 38,6                          | –                | 768                    |
| 9     | 70,4        | –                             | 29,6             | 732                    |
| 10    | 88,1        | –                             | 11,9             | 723                    |
| 11    | 91,8        | –                             | 8,2              | 714                    |

### **Порядок виконання роботи**

За завданням викладача розраховують хімічний склад шихти, визначають масу шихти для отримання 8–12 г скла. Водночас допускають, що скло утворюється тільки з оксидів, і летучість оксидів незначна. У співвідношенні з розрахунками зважують компоненти шихти з точністю до 0,1 г і ретельно їх перемішують. Шихту злегка зволожують (3–5 % води) і перемішують спочатку на аркуші паперу, а потім у порцеляновій ступці. Потім її переносять у попередньо прожарений і зважений тигель. Якщо у склад шихти входить борна кислота, то краще брати високі тиглі, оскільки під час розкладу кислоти відбувається сильне спінювання і можливий викид скломаси. Тигель, заповнений шихтою, за допомогою щипців ставлять у муфельну піч і включають її, поступово піднімаючи температуру до необхідної межі. Під час досягнення необхідної температури відмічають час і проводять варіння скла протягом 20–30 хв, після чого швидко, але акуратно виймають щипцями тигель із печі і виливають розплавлене скло у спеціальну форму або на чистий залізний лист. *Усі операції варіння скла проводять у рукавицях і захисних окулярах!* Після повного охолодження тигля і скла їх зважують і визначають вихід скла у відсотках від теоретично можливого.

### **II. Відновлення оксидів металів**

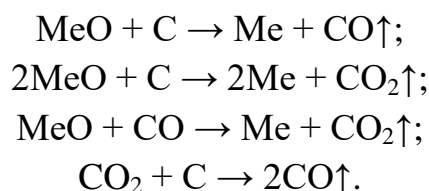
**Мета роботи:** отримати метал або його сплав відновленням оксиду металу або суміші оксидів металів вугіллям і визначити вихід металу.

**Обладнання:** муфельна піч на 1 100–1 200 °С, порцеляновий тигель з кришкою, порцелянова ступка.

**Реактиви:** порошки оксидів купруму (I) та (II), плюмбуму, цинку, стануму або нікелю, деревне вугілля, кристалічні хлориди калію та натрію.

#### **Теоретична частина**

При відновленні оксидів металів вугіллям перебігають реакції, що супроводжуються виділенням газоподібних оксидів карбону:



Під час ретельного подрібнення і перемішування вихідних компонентів ці реакції перебігають із достатньою швидкістю за досягнення певної температури, що відрізняється для різних оксидів металів.



Для відновлення вугіллям доцільно використовувати оксиди металів, які після реакції утворюють корольок металу або ж дають його у сплаві з іншими металами. Тому відновлення цим способом заліза з його оксидів є недоцільним, а мідь слід отримувати у вигляді її сплавів.

У промисловості для одержання металів застосовують газоподібні відновники оксидів металів, як-от водень, карбон (II) оксид і метан. Водень знаходить використання під час відновлення заліза з руди у бездоменних процесах і для одержання тугоплавких металів. Застосування водню і карбон (II) оксиду у промисловості і в лабораторії пов'язане зі значними труднощами, оскільки вони утворюють із повітрям вибухонебезпечні суміші.

### ***Порядок виконання роботи***

Масу наважки оксиду металу беруть із таким розрахунком, щоб отримати 2–5 г металу, а деревне вугілля – у півтора рази більше від стехіометричної кількості. Як флюс додають 1–2 % хлоридів натрію або калію. Цю суміш добре подрібнюють, перетирають і ретельно перемішують. Однорідний порошок засипають у тигель, ущільнюють товкачем і на поверхню укладають шар деревного вугілля зі шматочками розміром 1–2 см. Тигель щільно закривають кришкою, поміщають у муфельну піч і нагрівають до температури 800–1 000 °С (залежно від обраного оксиду металу), за якої витримують 20–30 хв. Після цього тигельними щипцями обережно виймають тигель із печі і залишають його охолоджуватися на спеціальній керамічній підставці до кімнатної температури. Потім висипають вміст, відокремлюють корольок металу і зважують. Визначивши за рівнянням хімічної реакції теоретичну масу металу чи сплаву, які мали виділитися внаслідок відновлення, і знаючи масу отриманого металу, розраховують його вихід у відсотках.

### ***Контрольні питання***

1. Які речовини називають склоутворювачами?
2. За допомогою яких речовин можна знизити крихкість, мутність, тугоплавкість скла?
3. Які сполуки здатні надати склу забарвлення? Наведіть приклади.
4. Які реакції використовують для відновлення металів із їх оксидів?
5. У чому складність використання водню для відновлення оксидів металів?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 8

### Синтези органічних речовин

**Мета роботи:** навчитися виконувати синтез органічних речовин, що є поширеними цільовими продуктами у промисловості.

#### I. Синтез фенолоформальдегідної смоли

**Обладнання:** пробірка, скляна трубка, пробіркотримач, спиртівка, скляна паличка, фільтрувальний папір.

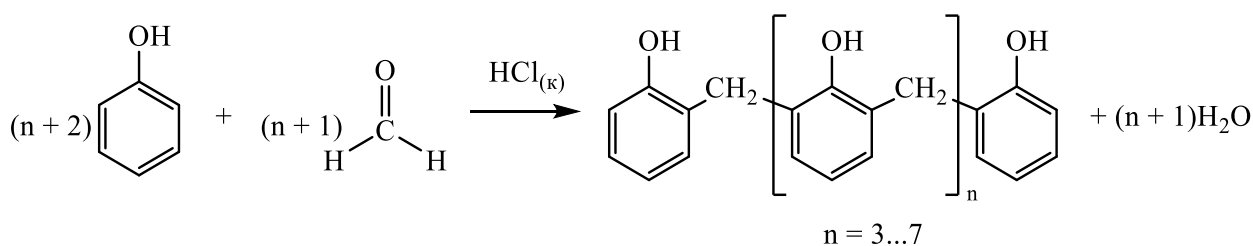
**Реактиви:** фенол (крист.), 40 %-вий розчин формаліну, соляна кислота (конц.).

#### Теоретична частина

Фенолоформальдегідні смоли отримують способом поліконденсації у розчині, оскільки мономери (фенол і формальдегід) знаходяться у водній фазі. Каталізатор (кислота або луг) також розчинні у реакційному середовищі (гомогенний каталіз). Поліконденсація у розчині – перспективний метод синтезу полімерів. Вона перебігає за м'яких температурних умов, не потребує використання вакууму та інертних газів. Однак така реакційна система гомогенна лише спочатку, а потім утворюється гетерогенна система: більш важка рідка олігомерна фаза і водна фаза – надсмольна вода. У склад водної фази, крім води, входять фенол і формальдегід, що не прореагували, а також розчинні продукти конденсації.

Реакція фенолу з формальдегідом – низькотемпературна (нижче 373 К), необоротна поліконденсація, за якої вода, що виділяється під час процесу, чинить невеликий позитивний ефект на швидкість реакції. Процес є складною сукупністю послідовних і паралельних реакцій. Головні фактори, які визначають механізм реакції, структуру і властивості одержаних олігомерів, – природа каталізатора і молярне співвідношення фенолу й формальдегіду. Залежно від цього одержують новолачні і резольні фенолоформальдегідні смоли.

Під час поліконденсації фенолу з формальдегідом у кислому середовищі і молярному надлишку фенолу утворюються лінійні олігомери – новолачні смоли.



Термопластичні новолачні смоли можна перевести у термореактивний стан, перетворити лінійні олігомери на тривимірні, зшиті полімери (резит). Для цього зазвичай проводять тверднення новолаків шляхом їх нагрівання з уротропіном.

Під час поліконденсації фенолу з молярним надлишком формальдегіду у лужному середовищі утворюються термореактивні олігомери – резольні смоли, які за умови нагрівання або на холоді у присутності кислот і основ переходять у стан резиту.

### ***Порядок виконання роботи***

У пробірку поміщають 2 г кристалічного фенолу, 3 мл 40 %-ного формаліну і декілька крапель концентрованої соляної кислоти як каталізатора. Пробірку закривають пробкою з довгою вертикальною трубкою і обережно нагрівають на невеликому полум'ї. Суміш стає однорідною, через деякий час мутніє. Припинивши нагрівання, дають суміші розшаруватись, після чого зливають верхній водний шар і окремо на аркуш паперу або картону виливають утворену смолу. Після охолодження смола твердне. Отриману смолу зважують на вагах та розраховують вихід смоли за рівнянням хімічної реакції.

## **II. Отримання бромоетану**

**Обладнання:** колба круглодонна на 50 мл, колба плоскодонна на 50 мл, холодильник, водяна баня, ділильна воронка.

**Реактиви:** етиловий спирт, сірчана кислота (конц.), дистильована вода, бромід калію (або бромід натрію).

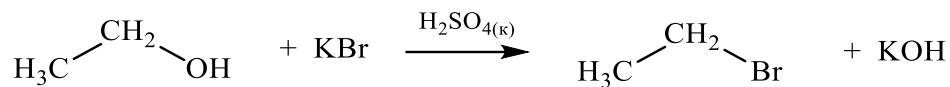
### ***Теоретична частина***

Галогенопохідні органічні сполуки широко застосовуються в лабораторній практиці та промисловості. Зумовлено це тим, що галогенопохідні сполуки можна добути з інертних парафінових, олефінових, нафтонових та ароматичних речовин. Бромпохідні сполуки можна добувати за допомогою вільного броду, бромоводню, а також неорганічних та органічних бромідів. Із бромпохідних добувають різноманітні речовини: аміни, феноли, олефіни тощо.

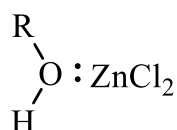
Бромоетан (або етилбромід) одержують у промисловості з етилену або етанолу. Це рідина з температурою кипіння 38,4 °С, яку застосовують для приготування розчину тетраетилплумбуму, що додається до моторних палив для підвищення їх октанового числа.

У процесі одержання бромоетану з етанолу необхідний каталізатор, що може також виступати як водовіднімаючий агент для зміщення рівноваги в бік утворення

продукту. Таким каталізатором є сірчана кислота, яка одночасно генерує HBr із броміду натрію:



Для рідкофазного гідрогалогенування спиртів інколи використовують як каталізатор насичений розчин  $\text{ZnCl}_2$  у соляній кислоті, а для газофазних процесів –  $\text{ZnCl}_2$  на поруватих носіях. Роль хлориду цинку як апротонної кислоти полягає у безпосередній активації молекули спирту:



або в утворенні сильної кислоти  $\text{H}_2\text{ZnCl}_4$ , що протонує спирт.

### **Порядок виконання роботи**

У колбу місткістю 50–100 мл поміщують суміш етилового спирту з сірчаною кислотою (8–10 мл), додають поступово 3 мл води і 5 г броміду калію (або броміду натрію). Закривають колбу пробкою з холодильником, кінець якого опускають у колбу або пробірку з сумішшю льоду і води (рис. 8.1).

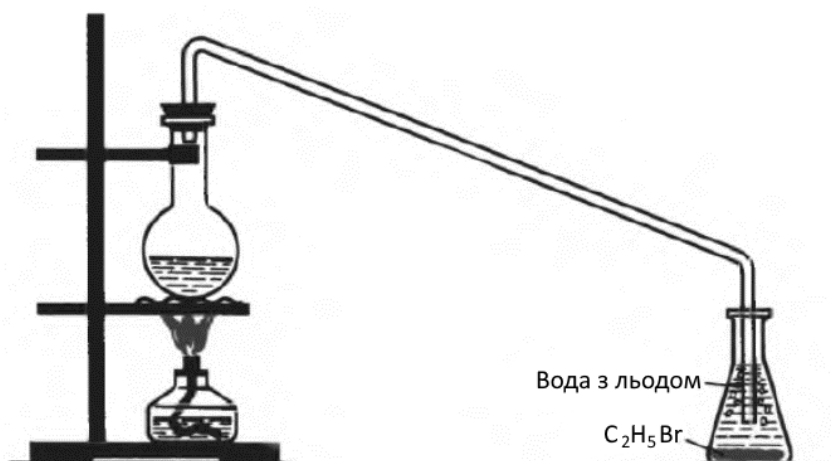


Рис. 8.1. Установка для отримання бромоетану

Обережно нагрівають суміш на водяній бані. Варто слідкувати за конденсацією парів бромоетану в холодильнику й утворенням шару важкої рідини під водою

у приймачі. Коли маслянисті краплі перестануть переходити у приймач, припиняють нагрівання.

Місткість приймача (без льоду!) переливають у ділильну лійку, дають рідині відстоятися і відділяють нижній шар бромостану. Визначають об'єм одержаного бромостану, розраховують із використанням довідних даних масу продукту і розраховують вихід за рівнянням реакції.

### III. Отримання оцтової кислоти

**Обладнання:** пробірка (2 шт.), лабораторний штатив, газовідвідна трубка, спиртівка.

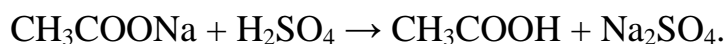
**Реактиви:** ацетат натрію, сірчана кислота (розв.).

#### *Теоретична частина*

Оцтова кислота повністю змішується з водою і багатьма органічними розчинниками, кипить за 118 °С, замерзає за 16,6 °С. Вона є однією з найважливіших аліфатичних кислот і широко використовується у харчових цілях, як розчинник, проміжний продукт для синтезу монохлороцтової кислоти, розчинників – естерів оцтової кислоти (етилацетат, бутилацетат тощо), мономерів (вінілацетат) тощо.

Раніше оцтову кислоту одержували сухою перегонкою деревини і біохімічним окисленням етанолу. Поширеним синтетичним методом одержання оцтової кислоти є взаємодія метанолу й СО за реакцією карбонілювання. До того ж застосовують метод прямого окислення ацетальдегіду з утворенням суміші оцтового ангідриду й оцтової кислоти. Отже, одночасно утворюються два промислово цінні продукти.

Оцтову кислоту у газовій фазі одержують під час нагрівання за реакцією ацетатів лужних металів із більш сильними кислотами, що здатні витіснити оцтову кислоту з її солей:



#### *Порядок виконання роботи*

Поміщають у пробірку 3–4 г ацетату натрію і додають 2–3 мл розчину сірчаної кислоти. Пробірку закривають пробкою з газовідвідною трубкою, вільний кінець якої опускають у порожню пробірку (рис. 8.2).



Рис. 8.2. Установка для отримання оцтової кислоти

Нагрівають суміш речовин на полум'ї до тих пір, поки у пробірці-приймачі збереться 1–2 мл рідини. Відчувається характерний запах оцтової кислоти. Визначають об'єм одержаної рідини, розраховують із використанням довідних даних масу оцтової кислоти і розраховують вихід за рівнянням хімічної реакції.

### **Контрольні питання**

1. Чому фенолоформальдегідні пластмаси переробляються в вироби переважно способом гарячого пресування, а не лиття під тиском?
2. Охарактеризуйте найважливіші пластмаси, які одержують із фенолформальдегідної смоли, і вкажіть галузі їх застосування.
3. Яких заходів техніки безпеки слід дотримуватися під час отримання бромостану?
4. Охарактеризуйте хімічні властивості галогеновуглеводнів (на прикладі бромостану). Наведіть рівняння реакції і вкажіть умови: а) взаємодії з металічним натрієм, магнієм; б) реакцій нуклеофільного заміщення; в) дегідрогалогенування.
5. Опишіть фізичні та хімічні властивості оцтової кислоти.
6. Які особливості застосування оцтової кислоти?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 9

### Визначення йодного числа у нафтопродуктах

**Мета роботи:** установити йодне число і вміст ненасичених вуглеводнів у нафтопродуктах – гасі та петролейному ефірі.

**Обладнання:** крапельниці (2 шт.), конічні колби зі шліфованою пробкою на 250 мл (2–3 шт.), бюретки на 50 мл (2 шт.), піпетка на 5 мл, циліндр на 25 мл, хімічна воронка.

**Реактиви:** етанол, розчин тіосульфату натрію концентрації 0,1 моль/л або 0,25 моль/л, водний (свіжоприготовлений) розчин крохмалю (0,5 %-вий), спиртовий розчин йоду (20 г йоду в 1 л етанолу), дистильована вода, розчин йодиду калію (10 %-вий).

#### *Теоретична частина*

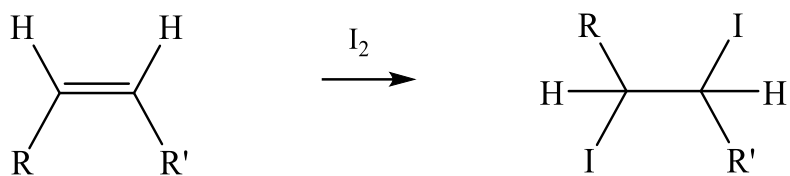
Йодне число – одиниця, за допомогою якої оцінюють вміст ненасичених вуглеводнів у паливі (бензині, дизелі), тобто нафтопродуктах. Йодне число виражається у кількості грамів йоду, яка може приєднатися за ненасиченими зв'язками до досліджуваної речовини масою 100 г. Чим більшим є йодне число, тим більший ступінь ненасиченості сполук у речовині.

Від хімічного складу нафтопродуктів залежить їх стабільність, тобто здатність зберігати свої якісні характеристики під час транспортування, зберігання й експлуатації. Основна причина малої стабільності – присутність у складі нафтопродуктів ненасичених вуглеводнів.

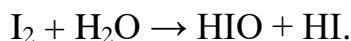
Аналізи з визначення хімічного складу переважно проводяться на нафтопереробних заводах під час підбору сировини для виготовлення ароматичних речовин і контролю цього виробництва. Для низки палив у стандартах передбачається характеристика групового вуглеводного складу, тобто вміст у них вуглеводнів окремих класів.

Майже для всіх світлих палив йодне число нормується як показник наявності в них ненасичених вуглеводнів, що обумовлюють хімічну нестійкість цих продуктів. Під впливом температури, кисню повітря, каталітичної дії металів, світла та інших факторів ненасичені вуглеводні швидко окислюються і полімеризуються. Це призводить до утворення смол у паливі та погіршення їх експлуатаційної здатності. Для 100 мл дизельного палива йодне число має бути не більше 6 г.

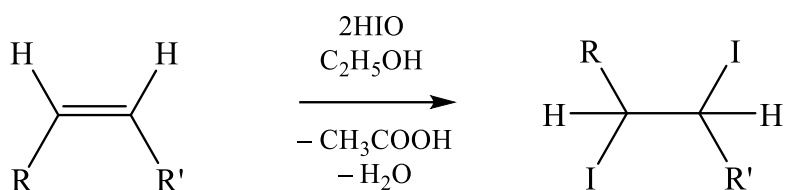
Взаємодію йоду з ненасиченими вуглеводнями можна подати у вигляді хімічного рівняння:



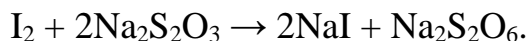
Визначення йодного числа передбачає обробку досліджуваного палива спиртовим розчином йоду, який взаємодіє з водою з утворенням гіпойодидної кислоти за реакцією:



Утворена гіпойодидна кислота вступає у взаємодію з ненасиченими сполуками за місцем подвійних зв'язків швидше, ніж йод, за рівнянням:

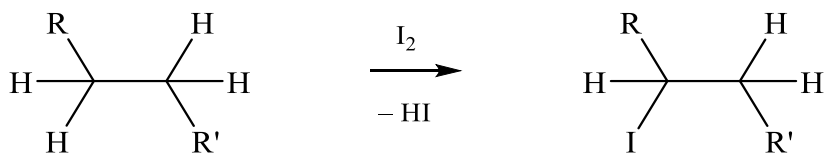


Надлишок йоду титрують розчином тіосульфату натрію:



Визначення необхідно проводити дуже швидко з дотриманням всіх рекомендованих умов.

Необхідно мати на увазі, що точність методу недостатня, оскільки можливе протікання побічних реакцій заміщення на світлі, що призводить до завищених результатів:



З іншого боку, через погану розчинність деяких палив у спирті можливе одержання занижених результатів за рахунок неповноти реакції приєднання йоду. До того ж аналіз ускладнюється й леткістю йоду, що потребує проведення реакції з дотриманням запобіжних заходів – у закритому посуді та з низьким потраплянням прямих сонячних променів.



### Порядок виконання роботи

Нафтопродукт фільтрують через вату (для видалення вологи), наливають у крапельницю і зважують. Наважку досліджуваного продукту треба брати залежно від пропонованого йодного числа: 2–4 г за умови значення йодного числа до 5 г йоду на 100 г нафтопродукту і 0,2–0,4 г за умови значення йодного числа більше 5 г йоду. Якщо невідомо орієнтовне йодне число, рекомендують проводити паралельно два аналізи (з різними наважками).

У конічну колбу (з пробкою на шліфу) з 15 мл етанолу приливають із крапельниці 10–15 крапель нафтопродукту. Крапельницю знову зважують і за різницею мас визначають наважку. Потім у колбу приливають із бюретки 25 мл спиртового розчину йоду, щільно закривають колбу пробкою, попередньо змоченою розчином йодиду калію, і обережно струшують колбу. Після цього додають 150 мл дистильованої води, закривають колбу пробкою, збовтують протягом 5 хв і залишають у спокої на 5 хв. Пробку і стінки колби обмивають невеликим об'ємом дистильованої води. Вміст колби титрують розчином тіосульфату натрію. Коли рідина в колбі стане світло-жовтого кольору, приливають у колбу 1–2 мл розчину крохмалю і продовжують титрувати до зникнення синьо-фіолетового кольору. Для визначення йодного числа проводять контрольний дослід так само, як описано вище, але без нафтопродукту.

Йодне число досліджуваного нафтопродукту (ЙЧ, %) визначають за формулою:

$$\text{ЙЧ} = (V - V_1) \cdot C \cdot M \cdot \frac{100}{m},$$

де  $V$  – об'єм розчину тіосульфату натрію, 0,1 або 0,25 моль/л, витраченого на титрування в контрольному досліді, л;

$V_1$  – об'єм розчину тіосульфату натрію, витраченого на титрування досліджуваного нафтопродукту, л;

$C$  – концентрація розчину тіосульфату натрію, моль/л;

$M$  – молярна маса йоду, г/моль;

$m$  – маса наважки досліджуваного продукту, г.

Вміст у нафтопродуктах ненасичених вуглеводнів  $\omega$  визначають за формулою:

$$\omega = \text{ЙЧ} \cdot \frac{M}{254},$$

де  $M$  – середня молекулярна маса ненасичених вуглеводнів досліджуваного нафтопродукту;

151 – середня молекулярна маса гасу;

82 – середня молекулярна маса петролейного ефіру;

254 – молекулярна маса йоду.

Одержане значення йодного числа порівнюють з нормативним.

### ***Контрольні питання***

1. Що характеризує йодне число?
2. На які характеристики палива впливають ненасичені сполуки в його складі?
3. Опишіть хімічні процеси, що лежать в основі визначення йодного числа.
4. Які побічні процеси знижують точність визначення йодного числа за зазначеною методикою?
5. Оцініть можливість використання бромиду для виконання методики, аналогічної визначенню йодного числа.

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 10

### Установлення вмісту хлориду калію у сильвініті

**Мета роботи:** визначення масової частки хлориду калію у сильвініті методом осадження.

**Обладнання:** аналітичні ваги, електроплита, електрична мішалка з функцією нагріву, термометр, колба Бунзена, воронка Бюхнера, воронка для гарячого фільтрування, водострумний насос, хімічні стакани на 150 мл і 250 мл, скляна паличка, фільтрувальний папір.

**Реактиви:** природний сильвініт або механічна суміш хлоридів натрію і калію, гексанітрокобальтат натрію, оцтова кислота (10 %-ва), етиловий спирт (96 %-вий), дистильована вода.

#### *Теоретична частина*

Промислове виробництво хлориду калію зумовлене його широким використанням, зокрема у сільському господарстві, де він застосовується як калійне добриво. Хлорид калію є також вихідною сировиною для промислового одержання інших сполук калію:  $\text{KOH}$ ,  $\text{KClO}_3$ ,  $\text{K}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{KNO}_3$ ,  $\text{KCN}$  тощо, що використовуються у скляній, парфюмерній, лакофарбовій, консервній, шкіряній, фармацевтичній та інших галузях промисловості.

Згідно з ДСТУ ISO 5310:2003, хлорид калію виробляється за маркою К (кристалізацією з розчинів), Ф (флотаційним збагаченням калійних руд) для технічних цілей та у вигляді гранул для сільського господарства. Останній з метою запобігання злежування обробляється аліфатичними амінами або іншими кондиціонувальними добавками.

Основною сировиною для одержання калійних добрив є сильвініт, що є механічною сумішшю хлоридів натрію і калію. Домішками сильвініту є невеликі кількості сполук магнію, кальцію. Одержання хлориду калію з сильвініту здійснюється методами галургії, флотації шляхом механічного збагачення породи і комбінуванням флотаційного збагачення з розчиненням і кристалізацією дрібних фракцій руди.

Метод галургії (метод розчинення і роздільної кристалізації) заснований на використанні різної розчинності хлоридів калію і натрію. Розділення цих солей можливе на основі їх різної розчинності у воді за різних температур. Розчинність хлориду калію у воді за умови підвищення температури різко зростає, тоді як розчинність хлориду натрію змінюється незначно. Внаслідок охолодження розчину сильвініту з нього кристалізується хлорид калію, а маточний розчин залишається насиченим відносно хлориду натрію. Подальша обробка сильвініту гарячим

маточним розчином приводить до того, що у нього переходить хлорид калію, а в залишку міститься хлорид натрію.

Метод флотації заснований на застосуванні різної змочуваності водою мінералів сильвіну (KCl) і галіту (NaCl) під час введення роздільного агента. Хлорид калію, що одержують флотаційним розділенням сильвініту, має більш крупну кристалічну структуру і менше злежується під час зберігання.

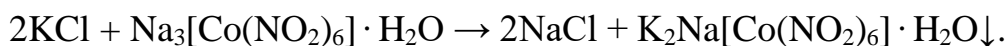
Флотацію проводять із насичених розчинів сирих калійних солей у присутності флотореагентів – октадециламіну, карбонових кислот. Поширеною є схема збагачення сильвінітів із попереднім виділенням глинистих домішок шляхом пінної флотації, але цей процес ускладнений руйнуванням піни і супроводжується значними втратами.

Комбіновані схеми флотаційного збагачення з розчиненням і кристалізацією успішно застосовуються для переробки руд із підвищеним вмістом мулових домішок.

### ***Порядок проведення роботи***

Зважують на аналітичних вагах по 1 г хлориду калію і вихідної суміші солей. Розчиняють наважки окремо в 50 мл води, підкислюють 1–2 мл оцтової кислоти. До отриманих розчинів доливають із піпетки краплями насичений розчин (за 50 °С) гексанітрокобальтату натрію до припинення випадіння жовтого осаду  $K_2Na[Co(NO_2)_6] \cdot H_2O$ .

Осади залишають під маточним розчином на 2 год для повного осадження. Повноту осадження перевіряють додаванням ще одної краплі гексанітрокобальтату натрію. Осади відфільтровують через лійку Бюхнера під вакуумом. На лійці їх промивають спочатку 10 %-вим розчином оцтової кислоти до появи безбарвного фільтрату, а потім етанолом. Осади висушують за кімнатної температури, зважують і розраховують масу хлориду калію згідно з рівнянням хімічної реакції:



Розрахунок хлориду в сильвініті проводять, виходячи зі співвідношення:

$$\begin{aligned} m_{\text{(осаду) з розчину KCl}} &= 100 \% ; \\ m_{\text{(осаду) з розчину сильвініту}} &= x \% . \end{aligned}$$

де  $x$  – відсотковий склад KCl в сильвініті.

Після визначення складу сильвініту можна здійснити його розділення. Для цього беруть наважку 25 г сильвініту. Окремо готують 75 г маточного розчину, що містить 12,5 % KCl і 18,5 % NaCl. Суміш солей поміщають у термостійкий

стакан на 250 мл, оснащений мішалкою і термометром (рис. 10.1), наливають маточний розчин і нагрівають під час перемішування до кипіння.

Після цього швидко відділяють розчин від осаду на лійці Бюхнера під вакуумом. Осад, що залишився на лійці, переносять назад у стакан, а фільтрат охолоджують до кімнатної температури. Осад хлориду калію, що під час цього випадає, відфільтровують, а фільтратом обробляють осад у стакані. Цю операцію повторюють 2–3 рази, після чого залишок і осад, що випав із фільтрату, висушують, зважують і складають матеріальний баланс процесу (табл. 10.1). Маточний розчин після останнього відділення хлориду калію можна зберігати для використання у подальших дослідах.

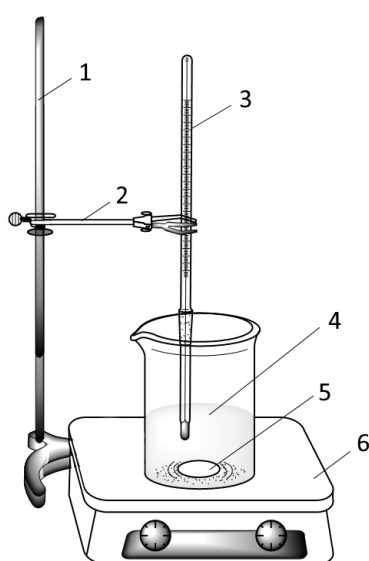


Рис. 10.1. Установка для виділення хлориду калію з сільвініту  
(1 – штатив; 2 – лапка; 3 – термометр; 4 – хімічний стакан із розчином сільвініту;  
5 – магнітний якорець; 6 – магнітна мішалка з функцією нагріву)

Таблиця 10.1. Матеріальний баланс одержання хлориду калію з сільвініту

| Вихідна маса, г               |  | Витрата, г                     |  |
|-------------------------------|--|--------------------------------|--|
| Сільвініт                     |  | $K_2Na[Co(NO_2)_6] \cdot H_2O$ |  |
| $Na_3[Co(NO_2)_6] \cdot H_2O$ |  | Маточний розчин, зокрема:      |  |
| $H_2O$                        |  | NaCl                           |  |
| Оцтова кислота                |  | $H_2O$                         |  |
|                               |  | Оцтова кислота                 |  |
|                               |  | Втрати                         |  |
| Всього                        |  | Всього                         |  |

### *Контрольні питання*

1. Що таке сильвініт?
2. Яке використання мають сильвініт і хлорид калію?
3. У чому полягає галургічний метод одержання хлориду калію?
4. Опишіть одержання хлориду калію методом флотації.
5. Що є осаджувачем для визначення вмісту хлориду калію у сильвініті?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 11

### Кінетика гетерогенної реакції окиснення сульфїту натрію

**Мета роботи:** дослідження кінетики гетерогенної реакції окиснення сульфїту натрію киснем повітря і визначення його порядку й ефективності константи швидкості.

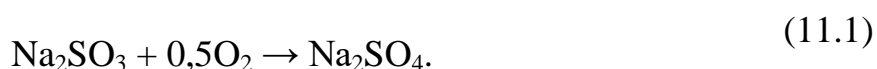
**Обладнання:** барботер (акваріумний компресор), рН-метр із комплектом електродів для потенціометричних вимірювань (ЕПВ-1, ЕСЛ-43-07, ЕСЛ-63-07), стакан на 150 мл, мірні колби об'ємом 250 мл або 500 мл (2 шт.), колби об'ємом 100 мл (3 шт.).

**Реактиви:** сульфїт натрію (ч. д. а. безводний, 1–3 г), дистильована вода, каталізатор  $\text{Co}^{2+}$  (сульфат або хлорид, 0,01 г).

#### Теоретична частина

Гетерогенні процеси в системі «газ–рідина» (газорідинні гетерогенні процеси) – це процеси, які включають хімічну взаємодію між реагентами, один із яких знаходиться в газовій фазі, а інший у рідкій. Приклади їх застосування як самостійних процесів: абсорбція аміаку розчинами азотної кислоти у виробництві аміачної селїтри, абсорбція аміаку розчинами сірчаної кислоти у виробництві добрив, хлорування рідких ароматичних вуглеводнів під час органічного синтезу. Газорідинні реакції застосовуються як допоміжні процеси очищення газових сумішей: абсорбція діоксиду сірки розчинами сульфїту і бісульфїту амонію під час санітарного очищення газів, очищення синтез-газу у виробництві аміаку. Абсорбція також є газорідинним процесом, і якщо він супроводжується хімічними реакціями в рідкій фазі, то говорять про хемосорбційний процес.

Реакція окиснення сульфїту натрію киснем повітря модулює процес



хемосорбційної очистки газових викидів і перебігає за рівнянням:

Процес є багатостадійним і включає такі стадії:

- I – дифузія кисню з об'єму газової фази до поверхні розподілу фаз газу та рідини;
- II – розчинення кисню у воді в поверхні розподілу фаз;
- III – дифузія розчиненого кисню від поверхні розподілу фаз в об'єм рідкої фази;
- IV – хімічна реакція: окиснення сульфїту в об'ємі рідкої фази розчиненим киснем.

Спостережувана швидкість перетворення  $W_{\text{сп}}$  описується рівнянням:

$$W_{\text{сп}} = \frac{kK_a p C}{1 + \frac{k}{\beta} \cdot C}; \quad (11.2)$$

де  $p$  – парціальний тиск газоподібного реагенту ( $\text{O}_2$ );

$C$  – концентрація рідкого реагенту (тут  $\text{Na}_2\text{SO}_3$ );

$k$  – константа швидкості реакції;

$K_a$  – константа абсорбції газоподібного реагенту;

$\beta$  – коефіцієнт масообміну між рідиною і газоподібними фазами.

Кисень є важкорозчинним газом, тому супротивом масовіддачі кисню з об'єму газу до поверхні розподілу фаз можна знехтувати, порівняно з супротивом масовіддачі в рідкій фазі.

Якщо інтенсивність хімічного перетворення набагато менша за інтенсивність масопереносу між фазами, то відбувається насичення об'єму рідкої фази киснем. Це кінетичний режим процесу.

Якщо інтенсивність хімічного перетворення набагато більша за інтенсивність масопереносу між фазами, то весь кисень, який надходить у рідку фазу, швидко вступає в реакцію в безпосередній близькості від поверхні розподілу фаз, масоперенос відбувається як у вільну від кисню рідину і швидкість процесу визначається швидкістю масопереносу кисню. Це дифузійний режим процесу.

Якщо інтенсивності хімічного перетворення і масопереносу співставлені, то процес буде перебігати в перехідній області.

Реакція (11.1) – менш інтенсивна, і газорідинний процес окиснення сульфіту натрію перебігає в кінетичній області.

Каталізатор може збільшити швидкість хімічного перетворення. Реакцію окиснення сульфіту натрію каталізують йони  $\text{Cu}^{2+}$  і  $\text{Co}^{2+}$ , в основному у вигляді сірчаноокислих солей міді і кобальту. Найбільш активним каталізатором є  $\text{Co}^{2+}$ , і у присутності солей кобальту швидкість окиснення на два–три порядки вища, ніж у присутності солей міді. Під час застосування солей кобальту окиснення буде перебігати переважно в дифузійній області. Під час використання солей міді процес іде в перехідній області. Отже, каталізатором можна регулювати швидкість хімічного перетворення.

### ***Порядок виконання роботи***

На рис. 11.1 представлена експериментальна установка, що складається з вимірювальної комірки (2) з електродами (3) (скляна ємність об'ємом 150 мл), у якій проводять процес окиснення сульфіту натрію киснем повітря, що подається



в розчин за допомогою акваріумного компресора з регульованим розходом повітря, яке подається (1), рН-метру (4) для контролю за перебігом процесу. Для перемішування розчину використовується магнітна мішалка (5).

Перед початком експерименту розраховують кількість (г)  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  і  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , необхідну для приготування 300 мл розчину кожного з них за вказаною викладачем концентрацією цих розчинів (від 0,06 до 0,12 н).

**Побудова калібрувальної залежності.** Готують по 300 мл розчину  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  і розчину  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  із заданою концентрацією (від 0,06 до 0,12 н), і три проміжні проби, об'ємом 100 мл кожна, шляхом змішування різних об'ємів приготованих розчинів  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  і  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (водночас загальна концентрація суміші повинна залишатися постійною).

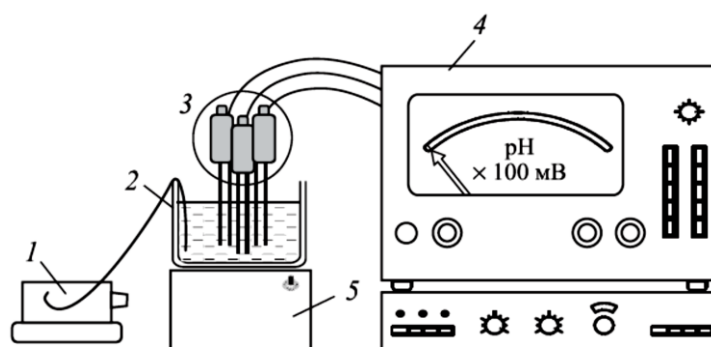


Рис. 11.1. Установка для вивчення кінетики окиснення  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  і  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  киснем повітря (1 – компресор; 2 – вимірювальна комірка; 3 – електроди; 4 – рН-метр; 5 – магнітна мішалка)

Послідовно заливаючи у вимірювальну комірку по 100 мл розчину  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , проміжних проб і розчину  $\text{Na}_2\text{SO}_3$ , вимірюють їх рН. Розчин  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  залишають у комірці. Вводити у проби каталізатор не обов'язково, оскільки концентрація його дуже мала, і його впливом на рН можна знехтувати.

Результати розрахунків вимірювань вносять до табл. 11.1.

Таблиця 11.1. Результати експериментальних вимірювань для побудови калібрувальної кривої

| № досліду | Температура розчину $T$ , К | $\text{Na}_2\text{SO}_3$   |                      | $\text{Na}_2\text{SO}_4$   |                      | рН |
|-----------|-----------------------------|----------------------------|----------------------|----------------------------|----------------------|----|
|           |                             | Концентрація $C$ , г·екв/л | Об'єм проби $V$ , мл | Концентрація $C$ , г·екв/л | Об'єм проби $V$ , мл |    |
|           |                             |                            |                      |                            |                      |    |

За результатами вимірювань будують графік залежності рН розчину  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  від його концентрації.

**Дослідження кінетики окиснення  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  в  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .** У вимірювальну комір-ку виливають 100 мл розчину  $\text{Na}_2\text{SO}_3$ , які залишились, і додають за вказівкою викладача каталізатор ( $\sim 0,01$  г) та вмикають барботер (витрата повітря задається викладачем, від 1,5 до 5 л/хв). Час початку подачі повітря приймають за початковий (нульовий) момент часу окиснення – йому відповідає вихідна концентрація  $\text{Na}_2\text{SO}_3$ .

Значення рН розчину фіксують на початку через 30 с (10–15 вимірювань), потім через 1 хв до тих пір, поки значення рН не досягне рН розчину  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , що буде свідчити про кінець процесу окиснення. За графіком  $\text{pH} = f(C_{\text{Na}_2\text{SO}_3})$  знаходять концентрацію розчину  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  в різний час. Отримані результати вносять у таблицю 11.2.

Таблиця 11.2. Результати кінетичних вимірювань окиснення  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  в  $\text{Na}_2\text{SO}_4$

| Початкова концентрація $C_{\text{Na}_2\text{SO}_3}$ , г·екв/л | Витрата повітря $V$ , л/хв | Час $t$ від початку дослідів, хв | рН | Поточна концентрація $C_{\text{Na}_2\text{SO}_3}$ , г·екв/л |
|---|----------------------------|----------------------------------|----|---|
|   |                            |                                  |    |   |

Будують графік залежності концентрації розчину  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  від часу окиснення, тобто криву кінетики окиснення  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  в  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  киснем повітря  $C_{\text{Na}_2\text{SO}_3} = f(t)$  (рис. 11.2.).

**Обробка результатів експерименту.** У деякому інтервалі концентрацій  $C$  дробово-раціональну функцію (11.2) можна апроксимувати ступеневою залежністю швидкості перетворення  $W_{\text{сп}}$  від  $C$ . Тоді спостережувана швидкість окиснення описується рівнянням:

$$W_{\text{сп}} = -KC^n, \quad (11.3)$$

де  $K, n$  – спостережувані константи швидкості і порядок перетворення, який отримують з кінетичної кривої окиснення (див. рис. 11.2.).

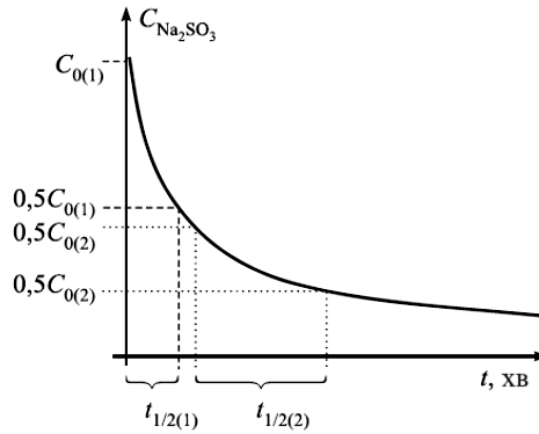


Рис. 11.2. Кінетична крива окиснення  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  в  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  киснем повітря

Процес у періодичному реакторі ідеального змішування описується рівнянням:

$$\frac{dC}{dt} = W_{\text{сп}}; \quad (11.4)$$

$$C_0^{1-n} - C^{1-n} = K(n-1)t. \quad (11.5)$$

Проінтегруємо рівняння (11.4), підставляючи значення  $W_{\text{сп}}$  з (11.3):  
де  $C_0$ ,  $C$  – початкова і поточна концентрації вихідної речовини.

З експериментальних даних треба знайти значення  $K$  і  $n$  у виразі (11.5). Застосуємо метод напівперіоду, або часу половинного перетворення. Напівперіод  $t_{1/2}$  – час, за який концентрація  $C$  вихідної речовини зменшується вдвічі, тобто  $C$

$$t_{1/2} = \left[ \frac{2^{n-1} - 1}{K(n-1)} \right] C_0^{1-n}. \quad (11.6)$$

$= C_0/2$ . Враховуючи це визначення, отримаємо з (11.5):

Позначимо вираз в квадратних дужках як  $M$  і прологарифмуємо вираз (11.6):

$$M = \frac{2^{n-1} - 1}{K(n-1)}; \quad (11.7)$$

$$\ln t_{1/2} = \ln M + (n-1) \ln C_0. \quad (11.8)$$

Отже, залежність (11.6) лінеаризується в координатах  $\ln C_0 - \ln t_{1/2}$ . На графіку експериментальної залежності  $C(t)$  обираємо декілька значень концентрацій (на рис. 11.2 показано два значення  $C$ ). Приймавши кожне з них як  $C_{0(t)}$ , знаходимо на графіку відповідний час напівперетворення  $\ln t_{1/2}$  і вносимо в табл. 11.3.

Таблиця 11.3. Обробка даних кінетичного експерименту

| $C_0$ | $C_0/2$ | $t_{1/2}$ | $\ln C_0$ | $\ln t_{1/2}$ |
|-------|---------|-----------|-----------|---------------|
|       |         |           |           |               |

За даними таблиці будемо графік у координатах  $\ln C_0 - \ln t_{1/2}$  і проводимо пряму лінію через нанесені точки. Тангенс кута нахилу визначає значення  $(n - 1)$ , а точка перетину прямої з ординатою – значення  $\ln M$ . Звідси можна порахувати порядок реакції  $n$ , а з (11.7) – спостережувану константу швидкості  $K$ .

### ***Контрольні питання***

1. Назвіть особливості і приклади застосування гетерогенних процесів.
2. Які області перебігу гетерогенних процесів розрізняють?
3. Які процеси належать до хемосорбційних процесів?
4. Яка стадія процесу окиснення сульфїту натрію є лімітуючою? На чому оснований вибір каталізатора цього процесу?
5. Як визначають спостережувані константи і порядок перетворення методом напівперіоду?

## ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 12

### Одержання штучного карналіту з бішофіту $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

**Мета роботи:** на підставі аналізу рівноважної діаграми розчинності трикомпонентної системи одержати штучний карналіт; скласти матеріальний баланс процесу та визначити технологічні показники: ступінь перетворення, вихід продукту, витратні коефіцієнти за вихідними компонентами.

**Обладнання:** електроплита, лабораторний автотрансформатор (ЛАТР), колба плоскодонна на 500 мл, прямий холодильник, мірний циліндр на 100 мл, піпетка на 20 мл (2 шт.), бюкси на 20 мл (2 шт.), мірна колба на 200 мл (2 шт.), бюретка на 50 мл.

**Реактиви:** хлормагнієвий розчин, що містить 24–27,5 % мас.  $\text{MgCl}_2$  та 1,8–2,6 % мас.  $\text{KCl}$ ; хлорид калію; 0,1 н розчин комплексону III (трилону Б); аміачно-буферна суміш (рН 10, готується за стандартною методикою: 10 г  $\text{NH}_4\text{Cl}$  змішується з 570 мл концентрованого розчину аміаку (25 %  $\text{NH}_3$ ) і розводиться дистильованою водою до 1 000 мл); розчин індикатору еріохрому чорного Т (0,2 г барвника на 20 мл етанолу).

#### *Теоретична частина*

Будь-які фазові перетворення в системі  $\text{KCl-MgCl}_2\text{-H}_2\text{O}$  зручно представити на діаграмі розчинності, яка має вигляд прямокутного трикутника у прямокутній системі координат (рис. 12.1).

Вершина прямого кута прийнята за початок координат і відповідає фазі чистої води. На катеті трикутника  $\text{H}_2\text{O-KCl}$  відкладається вміст  $\text{KCl}$  та  $\text{H}_2\text{O}$ , на катеті  $\text{H}_2\text{O-MgCl}_2$  – вміст  $\text{MgCl}_2$  та  $\text{H}_2\text{O}$ . Отже, кожен катет є двокомпонентною системою, а площа трикутника  $\text{KCl-MgCl}_2\text{-H}_2\text{O}$  – трикомпонентна.

У системі  $\text{KCl-MgCl}_2\text{-H}_2\text{O}$  існує кілька індивідуальних хімічних сполук: бішофіт  $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (позначення *Vi*), який має склад 46,83 % мас.  $\text{MgCl}_2$  та 53,17 % мас. води і буде зображений на діаграмі на ребрі  $\text{MgCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  точкою «*Vi*», і карналіт  $\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (позначення *Car*), який містить 26,83 %  $\text{KCl}$ , 34,27 %  $\text{MgCl}_2$  та 38,90 %  $\text{H}_2\text{O}$  й описується точкою «*Car*», що лежить відповідно до правила з'єднувальної прямої на лінії  $\text{Vi-KCl}$ .

Усі солі добре розчиняються у воді. Їхня спільна розчинність описується лінією *l-g-n-m-d*, яка може бути проведена за даними табл. 12.1.

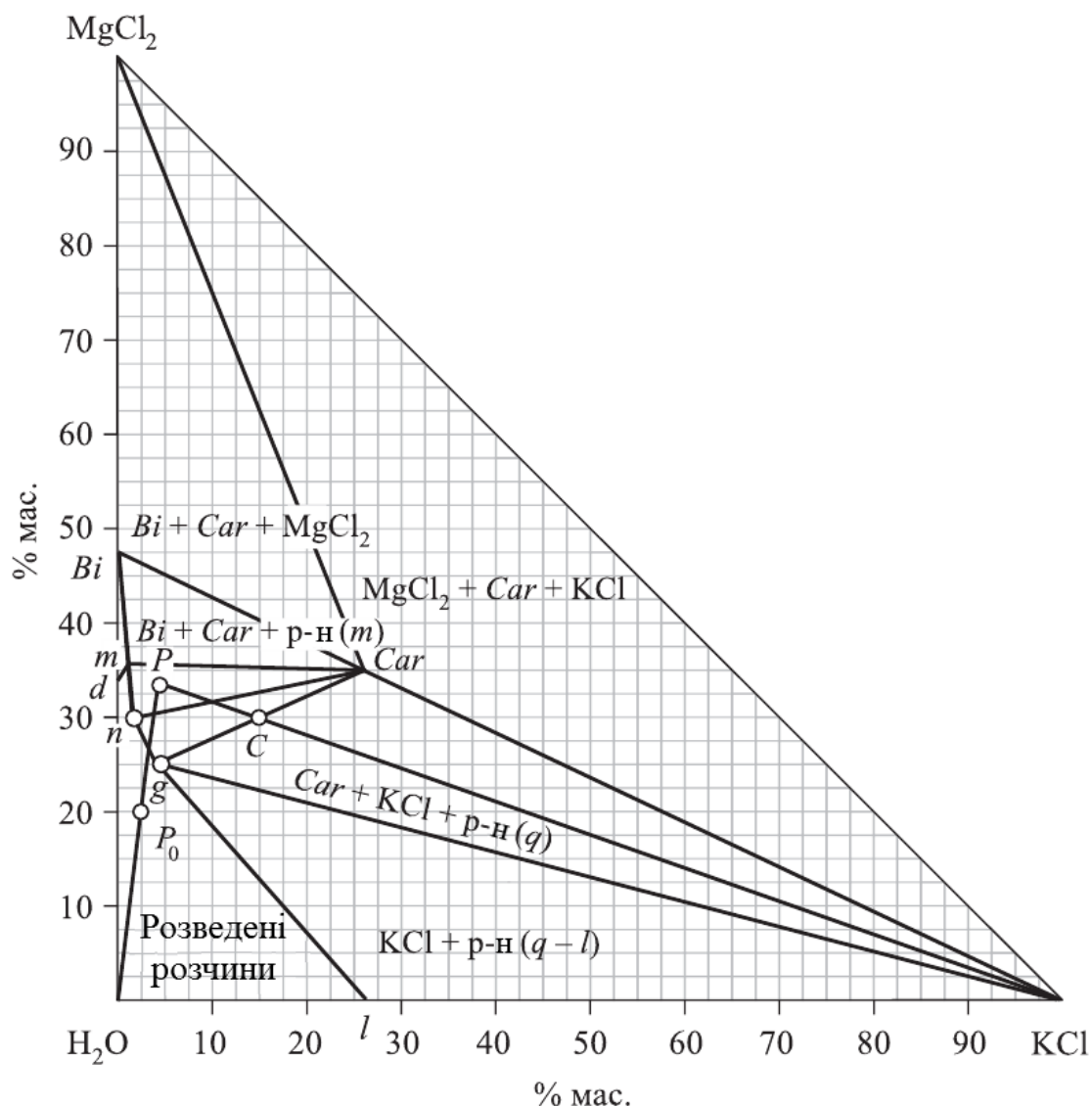


Рис. 12.1. Діаграма розчинності  $KCl-MgCl_2-H_2O$ , що відповідає рівноважному стану системи за  $20\text{ }^\circ C$

На рис. 12.1 нанесені склади розчинів, насичених різними солями:

- розчини  $l-g$  насичені  $KCl$ ;
- розчин  $g$  насичений  $Car + KCl$ ;
- розчини  $g-n-m$  насичені  $Car$ ;
- розчини  $m-d$  насичені  $Bi$ ;
- розчин  $m$  насичений  $Car + Bi$ .

Розглянемо області кристалізації різних фаз у цій системі. Будь-яка точка, що потрапляє в трикутник  $Car-m-g$ , міститиме дві фази: твердий карналіт  $Car$  та розчин, склад якого змінюватиметься від  $g$  до  $m$  (розчин  $g-m$ ).

Таблиця 12.1. Розчинність (% мас.) основних компонентів у системі  $\text{KCl-MgCl}_2\text{-H}_2\text{O}$

| Точка    | Тверді фази   | 20 °С           |              |                      | 100 °С          |              |                      |
|----------|---|-----------------|--------------|----------------------|-----------------|--------------|----------------------|
|          |   | $\text{MgCl}_2$ | $\text{KCl}$ | $\text{H}_2\text{O}$ | $\text{MgCl}_2$ | $\text{KCl}$ | $\text{H}_2\text{O}$ |
| <i>l</i> | $\text{KCl}$  | 0,00            | 26,25        | 73,75                | 0,00            | 36,03        | 63,97                |
| <i>g</i> | $\text{KCl} + \text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$                                     | 26,78           | 3,49         | 69,73                | 31,50           | 6,40         | 62,10                |
| <i>n</i> | $\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  | 33,34           | 0,38         | 66,28                | –               | –            | –                    |
| <i>m</i> | $\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O} +$<br>$+ \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ | 35,56           | 0,12         | 64,32                | 41,75           | 0,50         | 57,75                |
| <i>d</i> | $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$   | 35,32           | 0,00         | 64,68                | 42,33           | 0,00         | 67,60                |

У трикутнику  $\text{Car-Bi-m}$  існують три фази: дві тверді (карналіт  $\text{Car}$ , бішофіт  $\text{Bi}$ ) і розчин  $m$ , насичений і карналітом, і бішофітом.

У трикутнику  $\text{Car-g-KCl}$  існують три фази: дві тверді ( $\text{Car}$  та  $\text{KCl}$ ) та розчин  $g$ .

У трикутнику  $\text{KCl-g-l}$  дві фази: твердий  $\text{KCl}$  та розчин змінного складу  $l-g$ .

У полі  $m-g-l\text{-H}_2\text{O}$  знаходяться ненасичені (розведені) розчини, твердих фаз не утворюється.

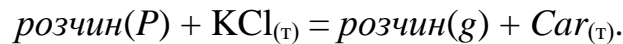
У трикутнику  $\text{MgCl}_2\text{-Car-KCl}$  існують лише тверді фази хлориду калію та різних кристалогідратів хлориду магнію. Ця область діаграми у роботі не розглядається.

У виробничих умовах переробці піддається розведений хлоромagneзійовий луг зі вмістом 22–26 %  $\text{MgCl}_2$  та 1,8–3 %  $\text{KCl}$ . Процеси випарювання вихідного розчину, розчинення хлориду калію та часткової кристалізації перебігають одночасно в одному апараті із занурювальним пальником. Основна кристалізація карналіту здійснюється у водоохолоджуваному холодильнику-кристалізаторі під час повільного зниження температури розчину від 100 до 20 °С. Змінюючи ступінь упарювання і кількість хлористого калію, що додається до вихідного хлоромagneзійового луку, можна отримати чистий карналіт або з домішками  $\text{Bi}$  і  $\text{KCl}$ .

**Випарювання вихідного розчину.** У процесі випарювання склад вихідного розчину (точка  $P_0$  на рис. 12.1) буде змінюватися на промені  $\text{H}_2\text{O-P}_0\text{-P}$  до заданої концентрації  $\text{MgCl}_2$  у розчині. Випарювання розчину слід проводити настільки, щоб його концентрація відповідала області трикутника  $m-g\text{-Car}$  з твердою фазою  $\text{Car}$ . Водночас гранична концентрація  $\text{MgCl}_2$  у випареному розчині (точка  $P$ ) складатиме 32–34 %. Із підвищенням концентрації  $\text{MgCl}_2$  до 35–38 % та охолодженням розчину до 20 °С відбудеться випадання кристалів бішофіту, оскільки склад розчину потрапляє в область кристалізації  $\text{Bi} + \text{Car}$ , що небажано.


**Конверсія хлориду калію.** До випареного розчину додається така кількість кристалів хлориду калію, щоб після їх повного розчинення та кристалізації  $\text{Car}$

система не потрапила в область кристалізації KCl. Подібний процес можна описати рівнянням:



Дозування KCl до розчину  $P$  відповідає такому складу маточного розчину, який був би насичений карналітом, хлоридом калію і перебував у рівновазі з кристалами карналіту (точка  $Car$ ). Склад пульпи до конверсії ( $P + \text{KCl}$ ) та після ( $g + \text{Car}$ ) повинен лежати на перетині ліній: розчинення  $P\text{--KCl}$  та кристалізації  $g\text{--Car}$  у ділянці трикутника  $g_{20}\text{--Car}\text{--KCl}$ , що являє собою двофазну рівновагу з фазами  $Car\text{--}g_{20}$  (точка  $C$ ). Такому складу пульпи відповідає максимальне дозування KCl і максимальна кількість карналіту, що утворюється.

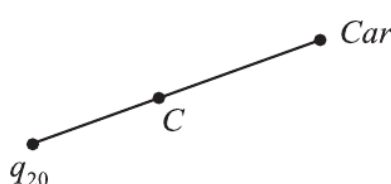
Кількість доданого KCl може бути визначена за правилом важеля з урахуванням довжин відрізків на прямій  $P\text{--KCl}$ :



$$m_{\text{KCl}} = m_P \frac{\overline{P-C}}{\overline{C-KCl}} \quad (12.1)$$

Отримана пульпа (точка  $C$ ) після завершення конверсії KCl й охолодження буде являти собою суміш кристалів карналіту та маточного розчину  $g_{20}$ .

**Кристалізація карналіту.** Кількість кристалів карналіту, що випали, також визначається за правилом важеля:



$$m_{\text{Car}} = m_C \frac{\overline{g_{20}-C}}{\overline{g_{20}-Car}} \quad (12.2)$$

У разі зниженого дозування KCl склад пульпи  $C$  потрапляє в трикутник  $g_{20}\text{--}m\text{--}Car$ , а склад маточного розчину  $m$ , що утворився під час кристалізації, ляже на криву  $g_{20}\text{--}m$ . У цьому разі випадає менше кристалів  $Car$ .

У разі підвищеного дозування KCl склад пульпи  $P + \text{KCl}$  може потрапити в ділянку трикутника  $g_{20}\text{--}m\text{--}Car$  із постійним складом рідкої фази та змінним складом твердих фаз.

$$P + \text{KCl} = g_{20} + \text{Car} + \text{KCl} = C.$$

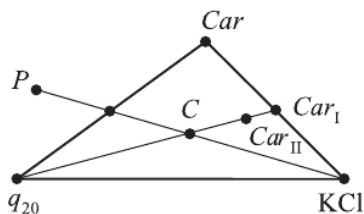
Тут точка лежить на лінії  $P + \text{KCl}$  і відповідає складу отриманої суміші.

Співвідношення між фазами можна визначити за правилом важеля. Для цього через точки  $C$  та  $g_{20}$  проводиться пряма лінія, яка у точці  $Car_1$  перетинає



лінію  $Car-KCl$ . Точка  $Car_I$  описує суміш кристалів  $Car$  і надмірного  $KCl$ , що не прореагував.

Тоді



$$\frac{m_{Car}}{m_{KCl}} = \frac{\overline{Car_I - KCl}}{\overline{Car - Car_I}} \quad (12.3)$$

Кількість маточного розчину визначається з виразу:

$$m_g = m_c \frac{\overline{C - Car_I}}{\overline{g_{20} - Car_I}} \quad (12.4)$$

**Фільтрація карналіту.** Залежно від швидкості охолодження пульпи можуть бути отримані більш або менш великі кристали карналіту. Дрібні кристали гірше фільтруються та містять більше маточного розчину. Тому отримані кристали можуть бути двофазною системою ( $Car$  + маточний розчин), або, за великого дозування  $KCl$ , трифазною системою ( $Car + KCl + g_{20}$ ).

Залежно від кількості маточного розчину, що залишився, склад відфільтрованого карналіту для двофазної системи на діаграмі відповідатиме точці  $Car_I$ , що лежить на лінії  $g_{20}-Car$ , що являє собою суміш кристалів  $Car$  і маточного розчину. Його кількість:

$$m_{Car_I} = m_c \frac{\overline{g_{20} - Car_I}}{\overline{g_{20} - Car_{II}}} \quad (12.5)$$

У разі отримання трифазного осаду  $Car + KCl + g_{20}$  склад його виражатиметься точкою  $Car_{II}$ , що знаходиться в полі трифазного трикутника  $g_{20}-Car-KCl$ .

Кількість захопленого маточного розчину  $m_{g_{20}}$  може бути визначена з виразу:

$$\frac{m_{g_{20}}}{m_c} = \frac{\overline{Car_{II} - Car_I}}{\overline{Car_I - g_{20}}} \quad (12.6)$$

**Розрахунок показників процесу.** Для розрахунку технологічних показників процесу необхідно знати:

- кількість вихідного бішофіту  $m_P$ , кількість отриманих кристалів карналіту  $m_{Car}$  та фільтрату  $m_{g_{20}}$ ;
- вміст  $MgCl_2$  у вологому осаді  $[MgCl_2]_{Car}$  і у вихідному бішофіті  $[MgCl_2]_P$ .

Стандартний бішофіт містить 24 %  $MgCl_2$ , а стандартний карналіт – 30 %  $MgCl_2$ . Вихід стандартного карналіту на стандартний бішофіт:

$$\frac{\frac{[\text{MgCl}_2]_{\text{Car}} \cdot m_{\text{Car}}}{30} \cdot \frac{[\text{MgCl}_2]_{P_0} \cdot 1000}{24}}{m_{P_0}}, \text{ кг/т.} \quad (12.7)$$

Витратні коефіцієнти:

- за КСl, 
$$\frac{m_{\text{KCl}} \cdot \frac{[\text{MgCl}_2]_{P_0} \cdot 1000}{24}}{\frac{[\text{MgCl}_2]_{\text{Car}} \cdot m_{\text{Car}}}{30}} \text{ кг/т.} \quad (12.8)$$

- за бішофітом, 
$$\frac{m_{P_0} \cdot \frac{[\text{MgCl}_2]_{P_0} \cdot 1000}{24}}{\frac{[\text{MgCl}_2]_{\text{Car}} \cdot m_{\text{Car}}}{30}} \text{ кг/т.} \quad (12.9)$$

Технічні умови на штучний карналіт припускають вміст не більше 9 % маточного розчину.

### **Порядок виконання роботи**

Лабораторна робота проводиться на експериментальній установці (рис. 2), що включає ємнісний реактор (колбу 2), у якому послідовно проводяться кілька технологічних процесів: випарювання вихідного бішофіту, конверсія наважки хлориду калію та кристалізація карналіту. Реактор з'єднаний з прямим холодильником Лібиха (3) для конденсації водяної пари, що відганяється. Конденсат збирається у мірному циліндрі (4).

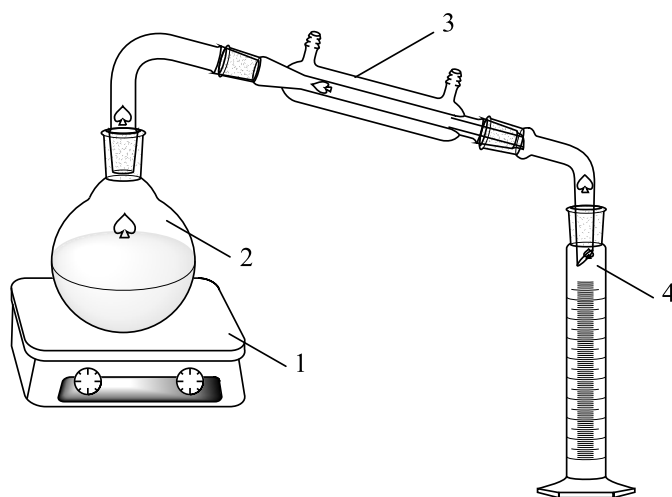


Рис. 12.2. Схема лабораторної установки для отримання карналіту (1 – електроплита; 2 – колба; 3 – холодильник; 4 – мірний циліндр)

Робота виконується відповідно до обраного варіанта. Спочатку визначаються положення точки вихідного бішофіту на діаграмі системи  $KCl-MgCl_2-H_2O$ . Потім розраховуються координати точки випареного розчину бішофіту залежно від кількості випареної води за одним з варіантів: а) 35 г; б) 40 г; в) 45 г. Далі визначається необхідна кількість хлориду калію для перетворення випареного бішофіту на карналіт і маточний розчин заданого складу. Розрахунки виконуються графічно з використанням зображення діаграми системи  $KCl-MgCl_2-H_2O$  та аналітично. Результати графічних побудов та розрахунків перевіряє викладач.

Потім на технічних вагах у сухій колбі об'ємом 500 мл зважується 200 г вихідного бішофіту. Взята наважка хлориду калію завантажується у бішофіт. Суміш перемішується. Колба з пульпою з'єднується з холодильником за допомогою гумового відводу. У холодильник подається водопровідна вода. Тільки після цього вмикається нагрівання. Водяні пари, що виділяються під час випарювання, конденсуються в холодильнику. Утворений конденсат збирають у мірному циліндрі (кількість конденсату визначено завданням). Під час досягнення кількості конденсату, що на 1–3 мл менше заданого, від'єднують колбу від холодильника і поміщають її в посудину з гарячою водопровідною водою на 25–30 хв, потім – на 30–40 хв у посудину з холодною водою. Пульпа, що утворилася, повинна бути охолоджена до 20 °С (контроль за термометром).

Холодну пульпу фільтрують на лійці Бюхнера в суху колбу Бунзена до повного відділення рідини. Маточним розчином ще раз промивають колбу, де проводилася конверсія, та знову розчин із кристалами виливають у лійку. Після закінчення фільтрації фільтрат переливають у сухий заздалегідь зважений стакан, а вологий залишок переносять у суху зважену чашку. Зважуванням на технічних вагах визначають масу фільтрату і масу вологого карналіту. Вміст  $MgCl_2$  в маточному розчині та в карналіті визначають комплексометричним методом.

**Комплексометричний метод визначення вмісту  $MgCl_2$ .** Метод заснований на утворенні міцного безбарвного комплексу іонів магнію з комплексоном III (трилоном Б) за реакцією витіснення іонів  $Mg^{2+}$  із забарвленого комплексу  $Mg$ -індикатор (індикатор – еріохром чорний Т). Наприкінці титрування, коли титрант – трилон Б – зв'яже всі іони  $Mg^{2+}$ , індикатор, що звільнився, надасть аналізованому розчину характерного забарвлення. Для підтримання потрібної кислотності середовища (рН 10) під час титрування додають аміачно-буферну суміш.

Наважки 3–4 г маточного розчину або 2–3 г вологого карналіту, взяті в бюкси на аналітичних вагах із точністю до 4-го знака, кількісно переносять у мірні колби на 200 мл. Наважки розводяться дистильованою водою до мітки та ретельно перемішуються. Аліквотна частина 20 мл відбирається піпеткою в конічну колбу на 250 мл, куди додають 10 мл аміачно-буферного розчину, 3–5 крапель розчину

індикатору та після перемішування повільно титрують 0,1 н розчином трилону Б, енергійно збовтуючи вміст, до переходу забарвлення розчину з вишнево-червоного до чисто-синього. Вміст  $MgCl_2$  (у %) у наважці вираховують за формулою:

$$C_{MgCl_2} = \frac{V \cdot K \cdot 0,004762 \cdot 100 \cdot 200}{m \cdot 20} \% \quad (12.10)$$

де  $V$  – об'єм 0,1 н розчину трилону Б, витраченого на титрування, мл;  
 $K$  – поправочний коефіцієнт до титру 0,1 н розчину трилону Б;  
 0,004762 – титр 0,1 н розчину трилону Б за хлоридом магнію, г  $MgCl_2$  на 1 мл 0,1 н розчину трилону Б;  
 200 – об'єм мірної колби, мл;  
 20 – аліквота, мл;  
 $m$  – наважка досліджуваної речовини, г.

За результатами аналітичного контролю на діаграму наносять точку складу вологого карналіту  $Car_1$  і визначають фазовий склад осаду. Склад маточного (за результатами аналізу) розчину повинен відповідати заданому значенню і є координатою точки  $n$ , що лежить на лінії  $m-g_{20}$ .

Потім заповнюються таблиці вихідних та експериментальних даних (табл. 12.2) і таблиця матеріального балансу (табл. 12.3) та розраховуються технологічні показники процесу.

Таблиця 12.2. Вихідні та експериментальні дані

| Показник, що визначається  | Кількість |
|--|-----------|
| Маса вихідного бішофіту, г   | 200,00    |
| Склад вихідного бішофіту, %:                                       |           |
| $MgCl_2$   |           |
| KCl  |           |
| $H_2O$   |           |
| Маса випареної води, г   |           |
| Задана концентрація $MgCl_2$ , %                                   |           |
| Маса хлориду калію, що витрачається на конверсію, г                |           |
| Визначена титруванням концентрація $MgCl_2$ у маточному розчині, % |           |
| Маса одержаного маточного розчину, г                               |           |
| Маса вологого карналіту, г   |           |
| Маса сухого карналіту, г   |           |

Таблиця 12.3. Матеріальний баланс процесу отримання штучного карналіту

| Прибуток |   |     |   | Витрата |  |   |   |
|----------|---|-----|---|---------|--|---|---|
| №        | Речовина  | г   | % | №       | Речовина   | г | % |
| 1        | Вихідний хлоромagneзійовий луг, зокрема:<br>MgCl <sub>2</sub><br>H <sub>2</sub> O |     |   | 1       | Штучний карналіт, зокрема:<br>MgCl <sub>2</sub><br>KCl<br>H <sub>2</sub> O |   |   |
| 2        | Хлорид калію  |     |   | 2       | Маточний розчин, захоплений карналітом                                     |   |   |
|          |   |     |   | 3       | Фільтрат   |   |   |
|          |   |     |   | 4       | Випарена вода  |   |   |
|          |   |     |   | 5       | Втрати   |   |   |
|          | Усього  | 200 |   |         | Усього   |   |   |

### Контрольні питання

1. З чого складається карналіт?
2. Чим відрізняється бішофіт від карналіту?
3. Покажіть на діаграмі розчинності KCl–MgCl<sub>2</sub>–H<sub>2</sub>O зони насичених розчинів.
4. Які стадії включає процес одержання штучного карналіту?
5. Опишіть методику визначення вмісту хлориду магнію у карналіті.

## ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ

### 1. Загальні правила поведінки у хімічній лабораторії

Під час роботи в лабораторії хімічної технології необхідно дотримуватися правил безпеки. Насамперед це загальні правила, що стосуються кожного, хто працює в лабораторії.

До роботи у лабораторії допускаються особи, які пройшли інструктаж із безпеки праці, що фіксується у спеціальному журналі. Не можна приступати до виконання роботи без дозволу викладача або лаборанта. Забороняється працювати в лабораторії одному.

Необхідно дотримуватися чистоти, тиші, порядку і правил техніки безпеки під час виконання робіт. Кожен здобувач має працювати на спеціально відведеному місці, вдягати халат, а за необхідності – рукавички, захисні окуляри. У лабораторії мають бути мило і рушник. Не допускається робота з брудним посудом, посуд слід вимити одразу після використання. Не можна виносити з лабораторії посуд та реактиви, залишати прилади, що працюють, без нагляду.

Кожен, хто працює в лабораторії, має знати, де знаходяться засоби протипожежного захисту: вогнегасники, ящик із просіяним піском, азбестова або повстяна ковдра, аптечка з медикаментами для надання первинної допомоги (розчини борної кислоти, йоду, гідрокарбонату натрію, а також вата, бинти, пластири, мазь від опіків).

Заборонено пробувати на смак реактиви, втягувати розчини ротом через піпетки. Нюхати речовини варто з обережністю, спрямовуючи до себе їх пари легким рухом руки. Не можна споживати їжу та напої у лабораторії, класти продукти на робочу поверхню, палити.

Під час нагрівання речовин у пробірках і колбах тримати їх отвором від себе для запобігання опіків через можливий викид гарячої маси. Не можна заглядати у відкриті посудини, що нагріваються. Працювати з їдкими, отруйними і сльозогінними речовинами можна лише у витяжній шафі. Пляшки з рідинами і твердими речовинами варто брати однією рукою за шийку, а іншою знизу підтримувати дно пляшки.

Не можна виливати у раковину залишки кислот, лугів, вогнєнебезпечних рідин тощо. Ці речовини варто зливати у спеціальні ємності, розташовані у витяжній шафі. Розчини, що містять концентровані кислоти і луги, перед виливанням у каналізаційну систему, потрібно нейтралізувати. Не можна залишати речовини у посуді без етикеток.

## **2. Робота зі скляним посудом**

Під час закривання тонкостінного скляного посуду пробкою варто тримати його за верхню частину шийки ближче до пробки. Нагрітий посуд не можна закривати притертою пробкою, поки він не охолоне.

Під час перенесення посуду з гарячою рідиною варто користуватися рушником, тримаючи посудину за дно і шийку. Не можна нагрівати товстостінний посуд і посуд із явними дефектами та тріщинами. Під час змішування й розведення речовин, що супроводжується виділенням тепла, варто користуватися термостійким скляним або порцеляновим посудом.

Під час складання установок зі скла заборонено застосовувати зусилля. Скляні трубки можна вставляти в отвір пробки, якщо він змащений гліцерином або змочений водою.

Про будь-які випадки биття скляного посуду необхідно повідомляти лаборанта. Великі шматки розбитого скла можна обережно зібрати, обгорнувши руки папером або у текстильних рукавичках, а дрібні уламки замести віником.

## **3. Робота з їдкими хімічними речовинами**

Мінеральні та сильні органічні кислоти під час потрапляння на шкіру і слизові оболонки викликають хімічні опіки. Потрапляння кислот, лугів та їх розчинів в очі може призвести до ураження рогівки, що викликає втрату зору.

Усі роботи з кислотами і лугами треба проводити у захисних окулярах і гумових рукавичках. Розводити сірчану кислоту можна лише у жаростійкому посуді, обережно доливаючи кислоту до води, а не навпаки, що викликає значне виділення теплоти і розбризкування кислоти. Розчиняти гідроксиди натрію і калію треба повільним додаванням їх до води невеликими порціями. Твердий луг можна брати лише щипцями, а не руками.

У разі розливання кислоти на робочу поверхню засипати рідину піском, нейтралізувати великою кількістю 2–3 %-вого розчину соди. У разі розливання лугу на робочу поверхню засипати рідину піском, нейтралізувати великою кількістю 2–3 %-вого розчину оцтової кислоти. В обох випадках прибрати залишки дерев'яним совком у спеціально відведене місце, ретельно промити робоче місце у рукавичках.

## **4. Безпека під час високотемпературних процесів**

Категорично забороняється торкатися нагрітих елементів установок, електроплит. Під час проведення лабораторних робіт, пов'язаних із нагріванням рідин до температури кипіння та з використанням їдких речовин, необхідно користуватися захисними окулярами.

Для нагрівання рідин дозволяється використовувати тільки тонкостінний посуд. Протягом усього процесу нагрівання забороняється нахилитися над посудом та заглядати у нього.

Нагрівання речовин, що виділяють токсичні пари та газу, дозволяється лише у витяжній шафі.

Під час роботи з горючими речовинами (ГР) і особливо легкозаймистими речовинами (ЛЗР) забороняється нагрівати їх на відкритому вогні або електроплиті та зберігати поблизу відкритого полум'я. Такі речовини нагрівають на водяній або олійній бані. Усі роботи з ГР та ЛЗР повинні проводитись тільки у витяжній шафі та за відсутності відкритого вогню.

Під час проведення робіт, пов'язаних із підігрівом і подальшою конденсацією та охолодженням парів ЛЗР, необхідно спочатку відрегулювати потік води, що проходить через холодильник, і тільки після цього включати електронагрівальні прилади.

## **5. Безпека використання електрообладнання**

Щоб уникнути ураження електричним струмом, категорично забороняється торкатися руками клем електроприладів (лабораторних автотрансформаторів – ЛАТР, електроплит, вимірювальних приладів) і торкатися струмопровідних дротів.

Не можна підключати електричні прилади вологими руками, торкатися руками захисного кожуха електричних приладів протягом їх роботи.

Забороняється регулювати, ремонтувати прилади, що працюють під напругою, працювати з несправними та незаземленими приладами.

Забороняється користуватися вогненебезпечними речовинами поблизу увімкнених електронагрівальних пристроїв.

Після закінчення експерименту установки повинні бути повністю відключені від електромережі (увімкнення та відключення установок здійснює обслуговуючий персонал).

## **6. Пожежна безпека**

У разі виникнення пожежі негайно відключити електроприлади по всій лабораторії. Швидко прибрати усі горючі речовини якомога далі від зони вогню, гасити пожежу за допомогою вуглекислотного вогнегасника, піску або протипожежної ковдри.

Не варто заливати полум'я водою, бо у багатьох випадках це призводить до розтікання полум'я і розширення зони пожежі.

У разі загоряння на комусь одягу треба швидко накрити постраждалого повстяною ковдрою. У жодному разі не можна постраждалому бігти, бо це лише



посилить на ньому полум'я. Можна погасити на собі одяг обливанням водою або швидким перекочуванням підлогою.

## 7. Долікарська допомога

Про будь-які нещасні випадки під час виконання лабораторної роботи необхідно терміново повідомляти викладача! В усіх випадках після надання долікарської допомоги варто викликати потерпілому швидку допомогу або супроводити у медпункт.

У разі потрапляння розчинів кислот або лугів на шкіру негайно промити місце ураження широким струменем прохолодної води, а потім, залежно від властивостей речовини, промити уражену ділянку 3 %-вим розчином соди (у разі опіку кислотою) або 2 %-вим розчином борної кислоти (у разі опіку лугом). Після цього ополоснути місце ураження водою і накласти пов'язку з риванолом або фурациліном. У разі потрапляння кислоти або лугу в очі рясно промити очі водою, викликати швидку допомогу. За наявності контактних лінз перед промиванням очей їх треба зняти, якщо це можливо.

У разі термічних опіків шкіру варто обробити спиртом, а потім змастити гліцерином або вазеліном. У разі сильних уражень постраждалу ділянку після обробки спиртом необхідно змастити маззю від опіків. Не можна використовувати жири для обробки ураженої ділянки.

У разі опіків фенолом необхідно розтирати побілілу ділянку шкіри гліцерином, поки не відновиться нормальний колір шкіри, потім промити уражене місце водою і накласти компрес із вати або марлі, змоченої гліцерином.

У разі випадкового потрапляння реактивів усередину необхідно пити якомога більше води. Водночас у разі отруєння кислотами випити склянку 2 %-вого розчину соди (гідрокарбонату натрію), у разі отруєння лугами випити склянку 2 %-вої лимонної кислоти.

У разі потрапляння всередину концентрованих кислот і втрати свідомості заборонено викликати блювання, застосовувати карбонати і гідрокарбонати як протиотруту, в такому разі необхідно викликати лікаря.

У разі отруєння необхідно вивести постраждалого на свіже повітря, зробити штучне дихання і викликати лікаря.

У разі необережної роботи зі скляним посудом можливі порізи і поранення. У разі порізів необхідно видалити з рани уламки і бруд, краї рани продезінфікувати 3 %-вим спиртовим розчином йоду, а потім накласти стерильну пов'язку. У разі сильних кровотеч слід накласти вище рани джгут (не більше ніж на 60 хв у теплу пору року і 30 хв у холодний сезон) і викликати лікаря.

У разі забоїв на уражене місце накладають тугу пов'язку і холод (лід у поліетиленовому мішечку). Забитий орган тримають піднятим і залишають у спокої.

## РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Курс «Основи хімічної технології» на платформі Moodle. URL: <https://moodle.donnu.edu.ua/course/view.php?id=2171> (дата звернення 08.08.2022).
2. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з курсу «Екотехнологія і моделювання технологічних процесів». Укладачі: В. М. Михальчук, А. М. Китайгородський. Донецьк, ДонНУ, 2001. 56 с.
3. Хімічна технологія. Виробничі хіміко-технологічні процеси: навч. посіб. / О. С. Лявинець, О. В. Скрипська, О. В. Кушнір. Чернівці: ЧНУ ім. Ю. Федьковича: Рута, 2019. 167 с.
4. Загальна хімічна технологія. Приклади вирішення задач з використанням MathCAD та MS Excel: навч. посіб. для студентів закл. вищ. освіти / О. В. Кутова, Р. В. Сагайдак-Нікітюк, І. В. Ковалевська; за ред. канд. техн. наук, доц. О. В. Кутової. Харків: НФаУ: Золоті сторінки, 2019, 126 с.
5. Денисюк Р. О. Хімічна технологія: підручник. Житомир: Вид-во ЖДУ ім. І. Франка, 2017. 344 с.
6. Загальна хімічна технологія: навч.-метод. посіб. / В. П. Беженар, О. М. Хацевич. Івано-Франківськ: Вид-во Прикарпатського національного університету ім. Василя Стефаника, 2011. 203 с.
7. Іванов С. В., Манчук Н. М., Борсук П. С. Загальна хімічна технологія: промислові хіміко-технологічні процеси: навч. посіб. Київ: Вид-во Нац. авіац. ун-ту «НАУ-друк», 2010. 280 с.
8. Іванов С. В., Борсук П. С., Манчук Н. М. Загальна хімічна технологія: навчально-методичний комплекс. Київ: НАУ, 2008. 288 с.
9. Сухий М. П. Енерготехнологія хіміко-технологічних процесів. Дніпропетровськ: Удм ХТУ, 2006. 202 с.
10. Братичак М. М. Хімія і технологія полімерів. Львів: Бескид БіТ, 2006. 496 с.
11. Яворський В. Т., Перекупко Т. В., Знак З. О., Савчук Л. В. Загальна хімічна технологія: підручник. Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2005. 552 с.
12. Гуменецький В. В. Процеси та обладнання нафтопереробних заводів: навч. посіб. Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2003. 440 с.
13. Топільницький П. І. Переробка нафтових і природних газів. Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 1998. 166 с.
14. Гончаров А. І., Серeda І. П. Екотехнологія: підручник для студ. хім. спец. університетів: в 2 ч. Київ: Вища шк., 1978. Т. 1. 286 с.

15. Гончаров А. І., Серода І. П. Екотехнологія: підручник для студ. хім. спец. університетів: в 2 ч. Київ: Вища шк., 1980. Т. 2. 278 с.
16. Fogler H. S. Elements of chemical reaction engineering. Pearson, 2020. 1088 p.
17. Crowl D. A., Louvar J. F. Chemical process safety. Pearson, 2019. 656 p.
18. Analysis, synthesis, and design of chemical process / R. Turton, J. A. Shaeiwitz, D. Bhattacharyya, W. B. Whiting. Pearson, 2018. 1520 p.
19. Green D. W., Southard M. Z. Perry's chemical engineers' handbook. McGrawHill, 2018. 2272 p.
20. Ghasem N., Henda R. Principles of chemical engineering processes. CRC Press, 2014. 468 p.

Навчальне видання

*Ютілова Ксенія Сергіївна*  
*Швед Олена Миколаївна*  
*Лісова Лілія Сергіївна*  
*Марценюк Наталія Сергіївна*

## **ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ З ОСНОВ ХІМІЧНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ**

*Навчально-методичний посібник*  
(для студентів спеціальності «Хімія»)

Редактор                                    О. А. Солдатова  
Технічний редактор                    Т. О. Важеніна-Гопрак

Підписано до друку 29.03.2023  
Формат 60 x 84/16. Папір офсетний.  
Друк – цифровий. Умовн. друк. арк. 4,88  
Тираж 30. Зам. 4

Донецький національний університет імені Василя Стуса  
21021, м. Вінниця, 600-річчя, 21  
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи  
до Державного реєстру  
серія ДК № 5945 від 15.01.2018