

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ЗПО «ДПТК»

Олександр СТІЛЕЦЬ

« 28 » серпня 2026 р.

ПОГОДЖЕНО

Заступник директора ЗНМР ЗПО «ДПТК»

Сергій ГОРДІЄНКО

« 28 » серпня 2026 р.

Конспект лекцій

З ДИСЦИПЛІНИ ХІМІЯ

КОНСПЕКТ 18 ТЕМ

Освітньо-професійна програма «Будівництво та експлуатація будівель і споруд»

Спеціальність G19 «Будівництво та цивільна інженерія»

Фахова передвища освіта · Фаховий молодший бакалавр

ЗМІСТ

ЗАГАЛЬНОХІМІЧНИЙ БЛОК · ТЕМИ 1–8

Тема 1. Основні поняття, закони та кількісні співвідношення в хімії	3
Тема 2. Будова речовини: атом, періодичний закон та хімічний зв'язок	14
Тема 3. Основні класи неорганічних сполук та закономірності хімічних перетворень	22
Тема 4. Розчини та способи вираження їх складу	31
Тема 5. Електроліти, кислотно-основні процеси та рН технологічних середовищ	40
Тема 6. Енергетика, швидкість та рівновага хімічних процесів	49
Тема 7. Окисно-відновні процеси та хімічні властивості металів	58
Тема 8. Основи електрохімії. Корозія металів та способи захисту	67

СПЕЦІАЛІЗОВАНИЙ БЛОК · ТЕМИ 9–18

Тема 9. Хімічна природа та властивості основних будівельних матеріалів	76
Тема 10. Повітряні в'язучі матеріали: вапно та гіпс. Хімічні процеси твердіння	83
Тема 11. Портландцемент: хімічний і мінералогічний склад, гідратація та твердіння	90
Тема 12. Бетони та будівельні розчини. Хімічні добавки і регулювання властивостей	97
Тема 13. Силікатні, керамічні та скляні будівельні матеріали	104
Тема 14. Метали в будівництві. Корозія арматури та металевих конструкцій	111
Тема 15. Хімічне руйнування бетону і кам'яних матеріалів в агресивних середовищах	118
Тема 16. Хімія води в будівництві: солі, жорсткість, агресивність води та висолоутворення	125
Тема 17. Полімерні, бітумні, лакофарбові, клейові та гідроізоляційні матеріали	132
Тема 18. Хімічні методи захисту та підвищення довговічності будівельних матеріалів і конструкцій	139

ТЕМА 1

ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ, ЗАКОНИ ТА КІЛЬКІСНІ СПІВВІДНОШЕННЯ В ХІМІЇ

Мета лекції. Повторити фундаментальні хімічні поняття, навчитися користуватися кількістю речовини, молярною масою, законами хімії та співвідношеннями за рівняннями реакцій.

План лекції

1. Хімія як наука. Речовина, атом, молекула, хімічний елемент.
2. Хімічні формули та кількісні характеристики речовин.
3. Основні закони хімії та стехіометричні співвідношення.
4. Газові закони та об'ємні співвідношення.
5. Розрахунки за хімічними рівняннями. Агрегатні стани речовини.

1. Предмет хімії та поняття речовини

Хімія вивчає склад, будову і властивості речовин, а також процеси їх перетворення. Під час хімічної реакції одні речовини перетворюються на інші; склад вихідних речовин та продуктів встановлюють за допомогою хімічних формул. Кількісні співвідношення між реагентами і продуктами визначають із законів хімії та рівнянь реакцій.

Речовина є формою існування матерії, яка характеризується певним складом і фізичними та хімічними властивостями за відповідних умов. Властивості чистої речовини відрізняються від властивостей суміші. Чисті речовини мають визначений склад; суміші утворені двома або більшою кількістю речовин, співвідношення яких може змінюватися.

Фізичні явища не змінюють хімічної природи речовини: наприклад, плавлення льоду або випаровування води. Хімічні явища супроводжуються зміною складу чи будови речовин; їх описують рівняннями реакцій. У подальших темах ці поняття потрібні для розуміння окиснення металу, роботи розчинів, електрохімічних і високотемпературних процесів.

Основою пояснення хімічних явищ є атомно-молекулярне вчення. Згідно з ним речовини утворені частинками, між якими діють сили притягання і відштовхування. Частинки перебувають у безперервному русі, а властивості речовини пов'язані як з природою цих частинок, так і з їхньою взаємодією та просторовим розміщенням. У процесі хімічного перетворення змінюються зв'язки між атомами, проте атоми хімічних елементів зберігаються. Саме це дає підставу складати рівняння реакцій і перевіряти правильність коефіцієнтів.

Вивчення загальної хімії об'єднує декілька взаємопов'язаних напрямів: будову речовин; закономірності зміни властивостей елементів; теплові ефекти і напрямки хімічних реакцій; швидкість і механізми хімічних перетворень. Ці питання не існують ізольовано. Наприклад, знаючи склад сполуки та її хімічні властивості, можна передбачити, з якими реагентами вона взаємодіятиме. Знання кількісного складу дозволяє визначати, скільки вихідних речовин необхідно для одержання заданої маси продукту.

Хімічні властивості виявляються під час перетворень речовини: здатності окиснюватися, відновлюватися, реагувати з кислотами, основами та іншими речовинами. Фізичні характеристики — температура плавлення, густина, колір, агрегатний стан — спостерігаються без зміни хімічної природи речовини. У технічній практиці обидві групи властивостей важливі. Так, метал перед початком зварювання має певний хімічний склад і певну температуру плавлення; нагрівання може змінити його агрегатний стан, а реакція з киснем — хімічний склад поверхневого шару.

Матеріал цього розділу: [1, с. 7–9]. [4, розд. 1]

2. Атоми, молекули, йони і хімічні елементи

Атом — електронейтральна частинка, що складається з позитивно зарядженого ядра та електронів. Атом є носієм хімічних властивостей певного елемента. Хімічний елемент — вид атомів з однаковим зарядом ядра. Коли атом віддає або приєднує електрони, він перетворюється на заряджену частинку — йон. Позитивно заряджені йони називають катіонами, негативно заряджені — аніонами.

Молекула — найменша частинка речовини молекулярної будови, що зберігає її хімічні властивості. Молекули складаються з атомів, сполучених хімічними зв'язками. Водночас не всі речовини мають молекулярну будову: метали, багато солей та речовини з атомними кристалічними ґратками мають іншу організацію частинок. У хімічному рівнянні необхідно розрізняти атом, молекулу та йон.

Якщо речовина утворена атомами одного хімічного елемента, її називають простою. Прості речовини можуть мати різні структурні форми: кисень O_2 та озон O_3 є різними простими речовинами Оксигену. Речовину з атомів різних елементів називають складною, або хімічною сполукою: H_2O , CO_2 , $NaCl$.

Таблиця 1.1. Основні хімічні поняття

Поняття	Зміст	Приклад
Атом	Електронейтральна частинка хімічного елемента	Fe, O, H
Молекула	Група атомів, сполучених хімічними зв'язками	H_2O , O_2
Йон	Електрично заряджена частинка	Na^+ , SO_4^{2-}
Проста речовина	Утворена атомами одного елемента	Fe, O_2
Складна речовина	Утворена атомами різних елементів	H_2O , $NaCl$

Хімічні символи — скорочені міжнародні позначення елементів. Індeksi в формулах показують кількість атомів даного елемента у формульній одиниці, а коефіцієнти перед

формулами в рівняннях — кількісні співвідношення між речовинами. Не можна замінювати коефіцієнт зміною індексу: така зміна означала б іншу речовину.

Поняття «хімічний елемент» і «проста речовина» не тотожні. Елемент позначає певний вид атомів; проста речовина — утворення з атомів цього елемента в конкретній формі існування. Наприклад, атоми Карбону можуть утворювати графіт і алмаз: елемент однаковий, але фізичні властивості простих речовин різні. Те саме стосується кисню та озону, молекули яких містять різне число атомів Оксигену.

Під час розгляду формул важливо відрізнити частинки, що існують окремо, від формульних одиниць. Молекула H_2O містить два атоми Гідрогену й один атом Оксигену. Формула NaCl відображає найпростіше кількісне співвідношення йонів Натрію та Хлору в кристалічній солі, а не окрему молекулу такої будови. Для металів хімічний символ зазвичай позначає елемент і просту речовину: Fe — Ферум як елемент і залізо як метал.

Хімічні символи поєднують у формулах у певному порядку. За формулою можна з'ясувати якісний склад — перелік елементів — і кількісний склад — співвідношення їх атомів. Запис $2\text{H}_2\text{O}$ означає дві молекули води, а не одну молекулу H_4O_2 . Коефіцієнт стосується формули загалом, тому помножує кількість кожного виду атомів. Розуміння цієї відмінності потрібне для запису матеріального балансу реакції та для подальших кількісних розрахунків.

Визначення і поділ речовин подано за: [1, с. 8–10].

3. Хімічна формула та відносні маси

Хімічна формула відображає якісний і кількісний склад речовини за допомогою символів елементів та числових індексів. Відповідно до формули визначають, які елементи входять до складу сполуки і скільки атомів кожного з них припадає на формульну одиницю. Для обчислення маси використовують відносні атомні маси елементів, наведені в періодичній системі.

Абсолютні маси атомів дуже малі, тому в хімії застосовують атомну одиницю маси, визначену через одну дванадцяту маси атома Карбону-12. Відносна атомна маса A_r показує, у скільки разів маса атома перевищує цю одиницю; вона не має розмірності. Відносна молекулярна маса M_r є сумою відносних атомних мас атомів, які входять до складу молекули.

$$M_r(\text{H}_2\text{O}) = 2A_r(\text{H}) + A_r(\text{O}) \approx 2 \cdot 1 + 16 = 18 \quad (1.1)$$

$$M_r(\text{CaCO}_3) = A_r(\text{Ca}) + A_r(\text{C}) + 3A_r(\text{O}) \approx 40 + 12 + 3 \cdot 16 = 100 \quad (1.2)$$

При записі розрахунку необхідно враховувати індекс біля кожного елемента, а якщо є дужки — множити кількість усіх атомів у дужках на індекс за ними. Наприклад, формула $\text{Ca}(\text{OH})_2$ містить один атом Кальцію, два атоми Оксигену та два атоми Гідрогену.

Масова частка елемента в речовині

За формулою сполуки можна визначити масову частку кожного хімічного елемента. Вона дорівнює відношенню маси атомів цього елемента у формульній одиниці до відносної

молекулярної маси всієї сполуки. Сума масових часток усіх елементів у чистій сполуці дорівнює одиниці, або 100 %.

$$w(E) = n \cdot A_r(E) / M_r(\text{сполуки}) \quad (1.3)$$

$$w(E), \% = w(E) \cdot 100 \% \quad (1.4)$$

Для води H_2O масова частка Гідрогену становить приблизно $2/18 = 0,111$, або 11,1 %, а масова частка Оксигену — $16/18 = 0,889$, або 88,9 %. Обидва значення разом дають 100 %. Цей підхід застосовують до будь-якої речовини зі сталою хімічною формулою.

Читання формул із дужками

У складних формулах числовий індекс за дужками вказує, скільки разів повторюється група атомів. Наприклад, у $\text{Ca}(\text{OH})_2$ дві гідроксильні групи, тому в розрахунку молярної маси враховують один атом Кальцію, два атоми Оксигену і два атоми Гідрогену. Для $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ в одній формульній одиниці містяться два атоми Алюмінію, три атоми Сульфуру і дванадцять атомів Оксигену. Неуважне розкриття дужок є поширеною причиною помилок у визначенні відносних молекулярних мас.

$$M_r[\text{Ca}(\text{OH})_2] = 40 + 2(16 + 1) \approx 74 \quad (1.5)$$

$$M_r[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3] = 2 \cdot 27 + 3(32 + 4 \cdot 16) \approx 342 \quad (1.6)$$

Розрахунок масової частки здійснюють у тій самій послідовності: спочатку знаходять відносну молекулярну або формульну масу, потім визначають внесок атомів обраного елемента. Наприклад, на Оксиген у CaCO_3 припадає $3 \cdot 16 = 48$ відносних одиниць маси за загальної маси 100. Його частка становить 48 %. Знання масової частки дозволяє перейти від маси сполуки до маси окремого елемента, а також виконати зворотний розрахунок.

З формули речовини можна визначити відношення мас елементів навіть тоді, коли загальна маса зразка невідома. Якщо маси компонентів у формульній одиниці відомі, їх відношення залишається сталим для будь-якої кількості чистої сполуки. Ця обставина є кількісним проявом закону сталості складу, який буде розглянуто далі. Усі значення відносних атомних мас при розрахунках потрібно брати з однієї прийнятої таблиці або з округлень, установлених умовою навчальної задачі.

Відносні маси та формульні співвідношення: [1, с. 10–11]; [2, с. 9–11]. [5, розд. про кількісні закони]

4. Кількість речовини та молярна маса

Кількість речовини позначають n ; її одиниця СІ — моль. Один моль містить визначену кількість структурних одиниць: атомів, молекул, йонів або інших частинок, які потрібно зазначати у формулюванні. Стала Авогадро становить приблизно $6,02 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹. Це співвідношення дає змогу переходити від макроскопічної маси речовини до числа її частинок.

$$N = n \cdot N_a \quad (1.7)$$

$$n = N / N_a \quad (1.8)$$

$$N_a \approx 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1} \quad (1.9)$$

Молярна маса M — маса одного моля речовини. У звичайних хімічних задачах її виражають у грамах на моль. Числове значення молярної маси в г/моль збігається з відносною молекулярною (або формульною) масою. Молярну масу не слід плутати з масою однієї молекули: перша стосується одного моля речовини, друга — однієї структурної одиниці.

$$n = m / M \quad (1.10)$$

$$m = n \cdot M \quad (1.11)$$

$$M = m / n \quad (1.12)$$

Наприклад, молярна маса води становить приблизно 18 г/моль. Зразок води масою 36 г містить 2 моль молекул H_2O . Для обчислення числа молекул у цьому зразку множать 2 моль на сталу Авогадро; отримують приблизно $1,204 \cdot 10^{24}$ молекул. Маса однієї молекули води дорівнює відношенню 18 г/моль до N_a .

Зв'язок основних величин

Величина	Позначення	Одиниця	Основне співвідношення
Маса речовини	m	г	$m = n \cdot M$
Кількість речовини	n	моль	$n = m / M$
Молярна маса	M	г/моль	$M = m / n$
Число частинок	N	безрозмірне	$N = n \cdot N_a$
Стала Авогадро	N_a	моль ⁻¹	$\approx 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$

Перетворення між масою, молями та частинками

Будь-яку задачу цього типу зручно розглядати як перехід між трьома характеристиками: масою m , кількістю речовини n і числом структурних одиниць N . Молярна маса є коефіцієнтом переходу між масою та кількістю речовини, а стала Авогадро — між кількістю речовини та числом частинок. Якщо відома маса зразка, спочатку визначають молярну масу за формулою, далі знаходять кількість речовини, а вже потім — число частинок.

При порівнянні двох однакових за масою зразків різних елементів число атомів може істотно відрізнятись. Наприклад, атомна маса Карбону приблизно вдвічі менша за атомну масу Магнію. Тому один грам Карбону містить приблизно вдвічі більше атомів, ніж один грам Магнію. Цей висновок одержують без підрахунку кожного атома — достатньо порівняти кількості речовини для однакових мас.

Під час використання формул необхідно узгоджувати одиниці вимірювання. Якщо молярну масу подано у грамах на моль, масу в чисельнику також потрібно виражати в грамах. Якщо масу задано в кілограмах, її спочатку переводять у грами або користуються молярною

масою в кг/моль. Аналогічно число молекул, атомів та інших частинок можна знаходити лише після уточнення, що саме в умові задачі вважають структурною одиницею речовини.

Визначення, формули та приклад для води: [2, с. 10–13].

5. Основні закони хімії

Закон збереження маси

Закон збереження маси формулюють так: маса речовин, що вступили в хімічну реакцію, дорівнює масі речовин, які утворилися внаслідок реакції, якщо враховано всі реагенти та продукти в замкненій системі. Під час звичайних хімічних перетворень атоми не зникають і не виникають, а лише змінюють порядок сполучення. Саме тому кількість атомів кожного елемента ліворуч і праворуч у правильно складеному рівнянні має бути однаковою.

$$m(\text{реагентів}) = m(\text{продуктів}) \quad (1.13)$$

Закон є підґрунтям для матеріального балансу і будь-якого кількісного розрахунку за рівнянням реакції. Якщо під час досліду спостерігається зменшення маси відкритої посудини, це може бути зумовлено виходом газоподібного продукту із системи. Для перевірки закону потрібно враховувати масу всіх утворених речовин, включно з газами.

Закон сталості складу і закон кратних співвідношень

Закон сталості складу для сполук сталого складу встановлює, що певна чиста речовина має постійний якісний і кількісний склад незалежно від способу її добування. Для води масове співвідношення Оксигену до Гідрогену становить приблизно 8 : 1. Водночас для деяких твердих сполук існує область змінного складу; під час застосування закону потрібно враховувати тип речовини.

Закон кратних співвідношень описує ситуацію, коли два елементи утворюють кілька сполук: маси одного елемента, що сполучаються з однаковою масою другого, відносяться як прості цілі числа. Так, у CO та CO₂ на однакову кількість Карбону припадають різні кількості Оксигену у співвідношенні 1 : 2.

Закон	Зміст для розрахунків	Ілюстрація
Збереження маси	Загальна маса вихідних речовин дорівнює масі всіх продуктів	$2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$
Сталості складу	Сполука сталого складу має незмінне співвідношення мас елементів	H : O у воді = 1 : 8
Кратних співвідношень	Для кількох сполук двох елементів маси одного елемента при сталій масі другого відносяться як невеликі цілі числа	CO та CO ₂ : O = 1 : 2

Закон еквівалентів

Закон еквівалентів виражає співвідношення мас речовин, що взаємодіють: вони пропорційні своїм еквівалентним масам для відповідної реакції. Еквівалентна маса залежить від конкретного хімічного перетворення та числа заміщуваних атомів Гідрогену, гідроксильних груп або електронів, що беруть участь у процесі. Тому її не слід механічно ототожнювати з молярною масою; для окремого реагенту вона може бути меншою за молярну масу в декілька разів.

$$m(A) / m(B) = E(A) / E(B) \quad (1.14)$$

Для простої нейтралізації сульфатної кислоти двома молями лугу NaOH один моль H_2SO_4 відповідає двом молям реакційноздатних гідроксильних груп. Тому в цій реакції еквівалентну масу кислоти обчислюють як молярну масу, поділену на два: приблизно $98/2 = 49$ г на моль еквівалентів. Пізніше ці співвідношення використовують під час вивчення кислотно-основних процесів і розрахунків концентрацій розчинів.

У правильно складеному рівнянні кількість атомів кожного елемента однакова до й після реакції — це дозволяє перевірити стехіометричні коефіцієнти.

Формулювання і приклади законів: [1, с. 11–12]; [2, с. 13–20].

6. Газові закони та об'ємні співвідношення

Закон Авогадро стверджує: за однакових температури й тиску рівні об'єми різних газів містять однакове число молекул. Отже, один моль різних ідеальних газів за одних і тих самих умов займає однаковий об'єм. Для шкільних і базових навчальних розрахунків часто використовують молярний об'єм газу 22,4 л/моль за нормальних умов: температури близько 273,15 К та тиску 101325 Па.

$$V = n \cdot V_m \quad (1.15)$$

$$n = V / V_m \quad (1.16)$$

$$V_m \approx 22,4 \text{ л/моль (н. у.)} \quad (1.17)$$

Молярний об'єм стосується газоподібних речовин за обумовлених температури й тиску. Його не можна безпосередньо застосовувати до рідини чи твердого тіла; для іншого стану газу потрібно використовувати дані, задані в умові задачі, або відповідне газове рівняння. У задачах за реакціями газів об'ємні співвідношення за однакових умов дорівнюють співвідношенням кількостей речовини.

Закон об'ємних співвідношень

Згідно із законом об'ємних співвідношень Гей-Люссака, об'єми газів, що взаємодіють, і газоподібних продуктів за однакових температури й тиску відносяться як прості цілі числа. Ці числа відповідають стехіометричним коефіцієнтам рівняння реакції за умови, що всі речовини, об'єми яких порівнюють, перебувають у газоподібному стані.



$$V(\text{H}_2) : V(\text{O}_2) : V(\text{H}_2\text{O}) = 2 : 1 : 2 \quad (1.19)$$

Наприклад, для повного згоряння двох об'ємів водню потрібен один об'єм кисню, а за температури, за якої вода залишається паром, утворюються два об'єми водяної пари. Вихідні об'єми й об'єми продуктів потрібно порівнювати за однакових температури та тиску.

Для визначення об'єму продукту спочатку складають урівняне рівняння реакції, потім установлюють відношення коефіцієнтів газоподібних речовин. Якщо у задачі задають масу реагенту, її перетворюють на кількість речовини, після чого обчислюють шуканий об'єм через V_m .

Послідовність переходу від маси до об'єму

У розрахунках газоподібних реагентів і продуктів інколи одночасно використовують масу, кількість речовини й об'єм. Наприклад, якщо відома маса газу, спочатку її ділять на молярну масу та отримують кількість речовини. Далі, за потреби, використовують молярний об'єм, що відповідає заданим умовам. Коли об'єм газу відомий, порядок обчислення є зворотним: спочатку визначають кількість речовини, потім за молярною масою знаходять масу.

$$n = m / M \rightarrow V = n \cdot V_m \quad (1.20)$$

$$n = V / V_m \rightarrow m = n \cdot M \quad (1.21)$$

Для одного моля кисню O_2 молярна маса дорівнює приблизно 32 г/моль, а об'єм за нормальних умов — близько 22,4 л. Для одного моля водню H_2 маса становить приблизно 2 г, але об'єм за тих самих умов залишається таким самим. Рівність молярних об'ємів різних газів за однакових умов є прямим наслідком закону Авогадро; вона не означає рівності їхніх мас або густини.

За законом об'ємних співвідношень коефіцієнти реакції можна безпосередньо застосовувати до об'ємів лише за відповідних обмежень. Насамперед усі порівнювані речовини мають бути газами, а температура і тиск для об'ємів, що порівнюються, повинні бути однаковими. Якщо продукт конденсується, його об'єм як рідини вже не дорівнюватиме стехіометричному газовому співвідношенню. У такому випадку розрахунок проводять через молі.

Газові закони та молярний об'єм: [1, с. 12]; [2, с. 12–13, 23].

7. Кількісні розрахунки за рівняннями реакцій

Стехіометричні коефіцієнти в урівняному хімічному рівнянні показують відношення кількостей речовини, що вступають у реакцію та утворюються внаслідок неї. Послідовність розрахунку: скласти формули реагентів і продуктів; урівняти рівняння; перевести відому масу або об'єм у кількість речовини; за коефіцієнтами визначити кількість потрібної речовини; обчислити масу або об'єм результату.

Приклад розрахунку за масою

Під час реакції магнію з киснем утворюється оксид магнію. Урівняне рівняння реакції має вигляд:



З рівняння видно, що з двох молів магнію утворюються два моля оксиду магнію, тобто кількості цих речовин рівні. Якщо взяти 24 г магнію, це приблизно один моль; за достатньої кількості кисню можна одержати один моль MgO масою близько 40 г. Різниця мас пояснюється тим, що до магнію приєднався кисень: маса кисню у продукті становить приблизно 16 г.

$$n(\text{Mg}) = m(\text{Mg}) / M(\text{Mg}) \quad (1.23)$$

$$n(\text{MgO}) = n(\text{Mg}) \quad (1.24)$$

$$m(\text{MgO}) = n(\text{MgO}) \cdot M(\text{MgO}) \quad (1.25)$$

Теоретичний і фактичний результат

Стехіометричне рівняння дає теоретичну кількість продукту за умови повного перебігу реакції без втрат. На практиці частина реагенту може залишитися невикористаною, а продукт може втрачатися під час відділення чи перенесення. Тому під час навчального розрахунку розрізняють теоретичний вихід і фактично одержану кількість продукту. За відомими значеннями обчислюють частку фактичного результату від теоретичного.

$$\eta = m(\text{фактична}) / m(\text{теоретична}) \cdot 100 \% \quad (1.26)$$

Коли в умові наведені кількості обох реагентів, спочатку визначають, який із них витратиться повністю. Саме за цим, обмежувальним, реагентом обчислюють теоретичну кількість продукту. Такі матеріальні баланси є продовженням закону збереження маси та рівнянь хімічних реакцій.

Перевірка розрахунку матеріальним балансом

Матеріальний баланс складають для всіх реагентів і продуктів, а не лише для шуканої речовини. У розглянутому прикладі один моль магнію масою близько 24 г реагує з половиною моля кисню масою близько 16 г. Маса продукту становить приблизно 40 г, тому загальна маса реагентів дорівнює масі продукту. Це підтверджує взаємозв'язок стехіометричних коефіцієнтів із законом збереження маси.

Розрахунок завжди починається з правильно складеної хімічної формули та урівняного рівняння. Якщо вказано, що один із реагентів узятو в надлишку, кількість продукту визначають за другим реагентом. Якщо такої умови немає, кількості обох реагентів порівнюють зі стехіометричним співвідношенням. Для навчальної задачі це можна зробити, розділивши кількість кожного реагенту в молях на його коефіцієнт: менший результат вказуватиме на реагент, який обмежує перебіг реакції.

За допомогою рівняння можна розраховувати не тільки масу продукту, а й об'єм газу, кількість утворених йонів у розчині або масу речовини, що вступає в реакцію. Якщо відомий

практичний вихід, після теоретичного розрахунку результат множать на частку виходу. Величину виходу у відсотках попередньо ділять на сто. Такі перетворення складають основу майбутніх практичних робіт із хімічного складу матеріалів, реакцій розкиснення та кількісних витрат речовин.

Розрахункова основа: [2, с. 12–13, 23–24]; [1, с. 11–12].

8. Агрегатні стани та їх значення для хімічних процесів

Речовини існують у різних агрегатних станах. Для твердого стану характерне відносно впорядковане розміщення частинок, для рідкого — збереження близьких міжчастинкових відстаней за можливості переміщення, для газоподібного — значно більші середні відстані між частинками. Перехід між станами залежить від температури й тиску та супроводжується поглинанням або виділенням енергії.

Опис агрегатних станів і наведені нижче ілюстрації: [1, с. 13–14].



Рис. 1.1. Розташування частинок у різних агрегатних станах

Плавлення — перехід із твердого стану в рідкий; тверднення — зворотний процес. Пароутворення переводить рідину в газоподібний стан, а конденсація — газ у рідину. Безпосередній перехід твердої речовини в газоподібний стан називають сублімацією. Під час фізичного переходу між агрегатними станами хімічний склад речовини може залишатися незмінним.

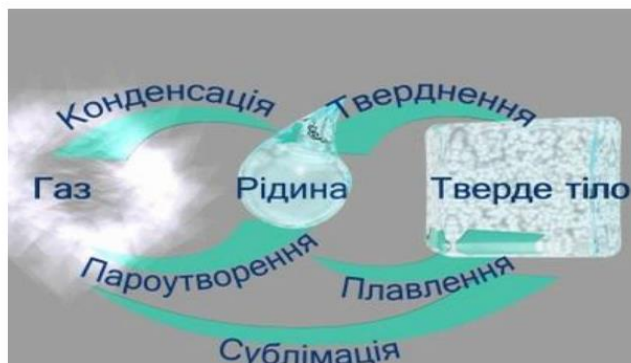


Рис. 1.2. Основні переходи між агрегатними станами

Питання для самоперевірки

1. Чим відрізняються поняття хімічного елемента, атома та простої речовини?
2. Як знайти кількість речовини за масою та за числом частинок?

3. У чому полягає закон збереження маси?
4. За яких умов можна використовувати молярний об'єм 22,4 л/моль?

Використана література

1. Назарко І. С., Вічко О. І. Загальна хімія: навчальний посібник для студентів технічних спеціальностей. Тернопіль: ТНТУ, 2019. С. 7–17.
2. Власенко Н. Є., Коваленко І. В., Потаскалов В. А. Хімія. Частина 1. Загальна хімія: навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. С. 9–24.
3. Хоботова Е. Б. Загальна та неорганічна хімія. Частина 1. Загальна хімія: підручник. Харків: ХНАДУ, 2023. Основні поняття та кількісні співвідношення.
4. Петрушина Г. О., Пугач Л. І., Завріна С. В. Загальна та неорганічна хімія: навчальний посібник. Дніпропетровськ: Пороги, 2016. Розділ 1 «Загальна хімія».
5. Степаненко О. М., Рейтер Л. Г., Ледовських В. М., Іванов С. В. Загальна та неорганічна хімія: у 2 частинах. Частина 1. Київ: Педагогічна преса, 2002. Розділи про атомно-молекулярне вчення та основні закони.

ТЕМА 2

БУДОВА РЕЧОВИНИ: АТОМ, ПЕРІОДИЧНИЙ ЗАКОН ТА ХІМІЧНИЙ ЗВ'ЯЗОК

1. Поняття про будову речовини та її значення для властивостей матеріалів

Мета лекції. Пояснити будову атома, зміст періодичного закону та основні типи хімічного зв'язку; показати, як будова частинок визначає властивості речовин і технічних матеріалів.

План лекції

1. Склад атома, ізотопи та електронна оболонка. 2. Розміщення електронів в атомі. 3. Періодичний закон і періодична система. 4. Закономірності зміни властивостей елементів. 5. Йонний, ковалентний і металічний зв'язки. 6. Будова кристалічних речовин та зв'язок будови з властивостями.

1.1. Від речовини до частинок, що її утворюють

Речовини відрізняються не тільки хімічним складом, а й способом розташування та взаємодії частинок. Наприклад, тверді метали проводять електричний струм, кристали кухонної солі за звичайних умов його практично не проводять, а розплав солі стає провідником. Для пояснення цих відмінностей недостатньо знати лише хімічні формули: потрібно розуміти будову атомів, вид зв'язку між ними та будову твердої речовини.

Вихідним поняттям є хімічний елемент — сукупність атомів з однаковим зарядом ядра. Атоми можуть об'єднуватися в молекули, утворювати йони або формувати кристалічні ґратки. У молекулярній речовині відносно відокремленою частинкою є молекула; в йонному кристалі існує впорядкована система катіонів і аніонів; у металі атомні остови розташовані в кристалі та взаємодіють із делокалізованими електронами.

Розвиток атомних уявлень пов'язаний із результатами експериментів. Досліди з розсіюванням заряджених частинок показали, що позитивний заряд і майже вся маса атома зосереджені в дуже малому ядрі. Електрони утворюють електронну оболонку, яка займає більшу частину об'єму атома. Сучасний опис електронів спирається на уявлення про орбіталі, однак для початкового вивчення достатньо розрізняти ядро, електронну оболонку та валентні електрони.

Будова зовнішнього електронного шару визначає типові хімічні властивості елемента. Саме зовнішні електрони насамперед беруть участь в утворенні зв'язків і реакціях, що супроводжуються утворенням йонів. У подальшому ці закономірності допоможуть зрозуміти активність металів, утворення поверхневих оксидів і вплив сплавотворних елементів на матеріали.

Джерела розділу: [1, розд. 2–3]; [2, теми 2–3]. [4, розд. 1]

2. Ядро атома, електрони та ізотопи

2.1. Основні частинки атома

Ядро містить протони та нейтрони. Протон має позитивний заряд, нейтрон електрично нейтральний; електрон має негативний заряд. Заряди протона й електрона рівні за модулем. У нейтральному атомі кількість електронів дорівнює кількості протонів. Під час утворення катіона атом утрачає частину електронів, під час утворення аніона — приєднує їх.

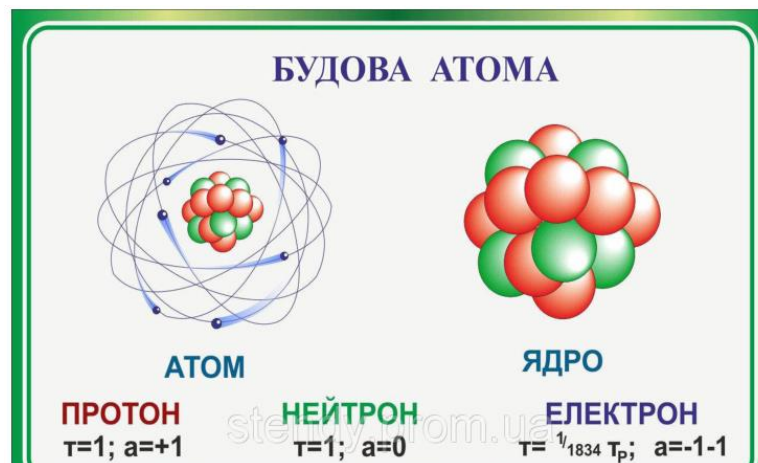


Рис. 2.1. Схематична будова атома та його складові частини

Порядковий номер елемента Z у періодичній системі дорівнює числу протонів у ядрі. Масове число A — сумарне число протонів і нейтронів у ядрі певного нукліда. Кількість нейтронів N_n визначають відніманням Z від A . Наприклад, для нукліда натрію $^{23}_{11}\text{Na}$ ядро містить 11 протонів і 12 нейтронів; нейтральний атом має 11 електронів.

$$A = Z + N_n \quad (2.1)$$

$$N_n = A - Z \quad (2.2)$$

Ізотопи — атоми одного хімічного елемента, які мають однаковий заряд ядра, але відрізняються кількістю нейтронів. Через це ізотопи мають різні масові числа. Хімічні властивості елементів насамперед визначаються електронною будовою, а не числом нейтронів, тому ізотопи одного елемента мають близькі хімічні властивості.

Позначення нукліда записують так: біля символу елемента ліворуч угорі ставлять масове число A , а ліворуч унизу — порядковий номер Z . Відносна атомна маса елемента в періодичній системі зазвичай не є цілим числом, оскільки враховує природний ізотопний склад. У звичайних навчальних розрахунках молярних мас використовують наведені в таблиці відносні атомні маси або обумовлені округлення.

Джерела розділу: [2, с. 22–25]; [3, розд. 1].

3. Електронна оболонка й електронні конфігурації

3.1. Енергетичні рівні та орбіталі

Електрони розміщуються в атомі за певними енергетичними станами. Для початкового пояснення оболонку поділяють на енергетичні рівні з головним квантовим числом n . Кожний рівень може містити певну максимальну кількість електронів; підрівні позначають літерами s ,

p, d, f. Орбіталь описує область простору, в якій імовірність виявити електрон є найбільшою. На одній орбіталі може перебувати не більше двох електронів із протилежними спінами.

$$N_e(\max) = 2n^2 \quad (2.3)$$

Формула $2n^2$ задає максимально можливу кількість електронів на рівні з номером n , але сама по собі не встановлює фактичного порядку заповнення всіх рівнів. Електрони заповнюють доступні орбіталі в порядку зростання енергії з урахуванням принципу Паулі та правила Гунда. У першому наближенні для елементів перших трьох періодів достатньо розуміти заповнення рівнів 1s, 2s, 2p, 3s і 3p.

Таблиця 2.1. Місткість найважливіших підрівнів

Підрівень	Кількість орбіталей	Максимум електронів
s	1	2
p	3	6
d	5	10
f	7	14

3.2. Приклади запису електронних конфігурацій

У Гідрогену один електрон: $1s^1$; у Гелію — два: $1s^2$. Атом Літію має електронну конфігурацію $1s^2 2s^1$. У Натрію одинадцять електронів, його конфігурація — $1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$. В останньому прикладі один електрон зовнішнього рівня пояснює характерну для Натрію здатність утворювати катіон Na^+ . Для Хлору зовнішня конфігурація $3s^2 3p^5$; атомові бракує одного електрона до заповненої зовнішньої оболонки, тому можливе утворення Cl^- .

Валентними називають електрони, що беруть участь в утворенні хімічного зв'язку. Кількість зовнішніх електронів для багатьох елементів головних підгруп допомагає передбачити типові ступені окиснення та характер утворюваних сполук. Однак валентність і ступінь окиснення не тотожні: перше поняття описує число зв'язків, друге — умовний заряд атома за прийнятого способу розподілу електронів.

Джерела розділу: [1, с. 38–45]; [2, с. 22–28].

4. Періодичний закон і закономірності зміни властивостей

4.1. Періоди, групи та сучасне формулювання закону

Періодичний закон встановлює закономірну залежність властивостей хімічних елементів та їхніх сполук від заряду ядра атома. У періодичній системі елементи розміщені за зростанням порядкового номера. Горизонтальні ряди називають періодами, вертикальні — групами. Елементи однієї групи нерідко мають подібну будову зовнішніх електронних оболонок, а тому виявляють подібні хімічні властивості.

Для елементів головних груп число зовнішніх електронів часто узгоджується з номером відповідної групи в традиційному позначенні. Наприклад, Літій, Натрій і Калій містять по

одному зовнішньому електрону та утворюють катіони із зарядом +1. Флуор і Хлор мають по сім зовнішніх електронів та схильні присднувати один електрон. У перехідних металів картина складніша через участь d-електронів, тому просте правило зовнішнього шару застосовують до них обережно.

4.2. Атомні радіуси, енергія іонізації та електронегативність

У межах періоду зі збільшенням заряду ядра атомні радіуси зазвичай зменшуються, а здатність атомів утримувати зовнішні електрони зростає. У межах групи зверху вниз кількість зайнятих електронних рівнів збільшується, тому розміри атомів зазвичай зростають. Енергія іонізації — енергія, необхідна для відривання електрона від вільного атома в газовому стані. Її зміна є періодичною, а не строго монотонною через особливості будови підрівнів.

Електронегативність характеризує здатність атома притягувати спільну електронну густину у зв'язку. Порівняння електронегативностей двох атомів дає можливість попередньо оцінити полярність зв'язку. Висока електронегативність характерна для неметалів, низька — для багатьох активних металів. Межі між типами зв'язків умовні: у реальних сполуках можуть поєднуватися різні внески в характер зв'язку.

Хімічний характер оксидів і гідроксидів також закономірно змінюється. Для активних металів типовими є основні оксиди, для багатьох неметалів — кислотні. Деякі оксиди й гідроксиди виявляють амфотерні властивості, тобто можуть реагувати і з кислотами, і з лугами. Цей зв'язок між місцем елемента в системі та властивостями його сполук стане основою наступної лекції.

Джерела розділу: [1, с. 46–59]; [2, с. 18–21]. [5, розд. про періодичний закон]

5. Йонний та ковалентний хімічний зв'язок

5.1. Йонний зв'язок

Йонний зв'язок виникає завдяки електростатичному притягання протилежно заряджених йонів. Типовий навчальний приклад — натрій хлорид. Атом Натрію має один електрон зовнішнього рівня та може втратити його, а атом Хлору може присднати електрон. У кристалі NaCl ці йони не об'єднані в окремі молекули: вони утворюють упорядковану тривимірну ґратку.



Кристали йонних сполук зазвичай мають порівняно високі температури плавлення та є крихкими. У твердому стані йони закріплені у вузлах ґратки, тому електропровідність мала. У розплаві та водному розчині рухливі йони можуть переносити електричний заряд. Не всі йонні сполуки добре розчиняються у воді: розчинність залежить від співвідношення взаємодії йонів у кристалі та в розчиннику.

5.2. Ковалентний зв'язок

Ковалентний зв'язок утворюється завдяки спільним електронним парам атомів. У молекулі водню H_2 два атоми Гідрогену використовують спільну електронну пару. Якщо атоми однакові, спільна пара розподілена симетрично і зв'язок є неполярним. У молекулі HCl атом Хлору сильніше притягує електронну густину, тому зв'язок полярний. У молекулах можуть існувати одинарні, подвійні й потрійні зв'язки залежно від числа спільних електронних пар.

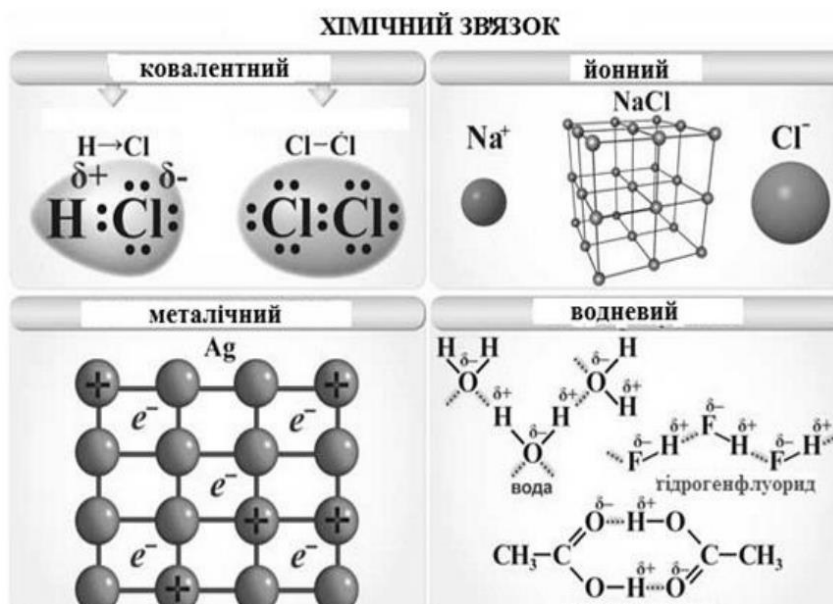


Рис. 2.2. Порівняння основних типів хімічного зв'язку

Для речовин із ковалентним зв'язком агрегатний стан і температура плавлення залежать від того, чи існують окремі молекули, чи атоми зв'язані в суцільну просторову сітку. Наприклад, речовини з атомними кристалічними ґратками істотно відрізняються від простих молекулярних речовин. Отже, сам термін «ковалентний зв'язок» ще не визначає всіх фізичних властивостей матеріалу.

Джерела розділу: [1, розд. 3]; [2, с. 32–38].

6. Металічний та водневий зв'язки

6.1. Металічний зв'язок

У металевих кристалах позитивні атомні остови взаємодіють із електронами, які не належать одній певній парі сусідніх атомів. Такий зв'язок називають металічним. Узагальнена картина пояснює високу електричну й теплову провідність багатьох металів, їхню здатність до пластичної деформації та характерний металічний блиск. Водночас конкретні властивості металу визначаються також будовою його кристалічної ґратки, дефектами й хімічним складом.



Рис. 2.3. Схематичне зображення металічного зв'язку

Під час прикладного вивчення металів важливо відрізнити тип хімічного зв'язку від технологічних властивостей: міцність сталі, наприклад, не визначається лише фактом наявності металічного зв'язку. На неї впливають кількість вуглецю, легувальні елементи, фазовий склад і термічна історія матеріалу. Проте загальне розуміння металевої структури необхідне для подальшого вивчення сплавів, зварювання та корозії.

6.2. Водневий зв'язок і міжмолекулярні взаємодії

Водневий зв'язок може виникати за участю атома Гідрогену, сполученого з сильно електронегативним атомом, і неподіленої електронної пари іншого електронегативного атома. Для води водневі зв'язки впливають на структуру рідини, температуру кипіння та низку її фізичних властивостей. Це не той самий тип зв'язку, що звичайний ковалентний О–Н усередині молекули H_2O .

Між молекулами діють також слабші міжмолекулярні сили. Їхня сукупність визначає агрегатний стан молекулярних речовин і впливає на леткість, температуру плавлення та розчинність. Для розуміння розчинів важливо, що розчинення залежить не тільки від будови речовини, але й від нових взаємодій частинок із молекулами розчинника. Саме тому йонні, полярні й неполярні речовини поведуться у воді неоднаково.

Зв'язки в складних технічних матеріалах не завжди вкладаються в одну ідеальну модель. У сплавах, оксидах, нітридах і кераміці можуть одночасно проявлятися різні види хімічної взаємодії. При вивченні конкретного матеріалу спершу визначають його склад та будову, а вже потім зіставляють їх із властивостями.

Джерела розділу: [1, с. 60–85]; [2, с. 40–45].

7. Кристалічні ґратки та властивості твердих речовин

7.1. Чотири навчальні типи кристалічних речовин

Кристалічні речовини мають упорядковане розміщення частинок. У навчальній класифікації розглядають молекулярні, йонні, атомні та металічні кристалічні ґратки. Їхня будова пояснює відмінності в електропровідності, механічних властивостях і поведінці під час нагрівання. Відповідність між видом ґратки та властивістю не є абсолютно жорсткою: для окремих речовин можливі винятки.

Таблиця 2.2. Зв'язок будови кристалічних речовин із властивостями

Тип ґратки	Частинки у вузлах	Характерна ознака	Приклад
------------	-------------------	-------------------	---------

Тип ґратки	Частинки у вузлах	Характерна ознака	Приклад
Молекулярна	Молекули	Зазвичай відносно низькі температури плавлення	I ₂ , лід
Йонна	Катіони й аніони	Крихкість, провідність розплавів	NaCl
Атомна	Атоми	Часто висока твердість	Алмаз, SiO ₂
Металічна	Атомні остови, електрони	Пластичність, провідність	Fe, Cu

Молекулярні кристали утримуються порівняно слабкими міжмолекулярними взаємодіями. Йонні кристали побудовані з протилежно заряджених йонів; зміщення їхніх шарів може призвести до зближення однойменно заряджених йонів і розколювання кристала. В атомних кристалах зв'язки утворюють протяжну сітку, тому їх руйнування потребує значної енергії. Металічні кристали допускають зміщення атомних шарів без негайного руйнування всього зв'язувального електронного середовища.

7.2. Чому кристалічні структури важливі для технічних металів

У твердих металів існують різні типи просторового упорядкування атомів. При зміні температури в окремих металів може змінюватися тип кристалічної структури. Хімічний склад сплаву та наявність домішок впливають на фазовий стан і властивості. Під час зварювання метал зазнає нагрівання, плавлення та наступної кристалізації; для розуміння цих процесів необхідні уявлення про частинки та їхній зв'язок, але докладні фазові перетворення вивчають у спеціальних дисциплінах.

Під час роботи з періодичною системою доцільно встановлювати ланцюжок «будова електронної оболонки — положення елемента — типові хімічні властивості — характер сполук». Він допомагає пояснювати, чому алюміній утворює оксидну плівку, натрій є активним металом, а вуглець може утворювати речовини з різко відмінними властивостями. Це перехід від запам'ятовування окремих фактів до розуміння закономірностей.

Джерела розділу: [2, с. 42–46]; [3, розд. 3].

8. Приклади аналізу будови речовини та підсумок

8.1. Послідовність характеристики елемента

Щоб охарактеризувати елемент за періодичною системою, знаходять його порядковий номер, номер періоду і групи, записують електронну конфігурацію та визначають зовнішні електрони. Далі з урахуванням положення у періодичній системі роблять обережний висновок щодо його металевих або неметалевих властивостей і можливих сполук. Ця послідовність застосовна насамперед до елементів головних груп; для перехідних металів потрібні додаткові відомості.

Наприклад, атом Магнію має $Z = 12$ та електронну конфігурацію $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2$. Два електрони зовнішнього рівня можуть бути віддані з утворенням Mg^{2+} . З атомами Оксигену Магній утворює йонну сполуку MgO . Атом Оксигену має конфігурацію $1s^2 2s^2 2p^4$ і шість електронів зовнішнього рівня; під час утворення оксиду він набуває формального заряду -2 . Формула MgO відображає співвідношення йонів 1:1.



Характер хімічного зв'язку не можна надійно визначати лише за наявністю металу або неметалу у формулі. Для навчальної класифікації використовують сукупність відомостей: різницю електронегативностей, будову речовини та її властивості. Зокрема, полярність окремого зв'язку і полярність молекули — різні характеристики: у симетричній молекулі дипольні моменти окремих полярних зв'язків можуть взаємно компенсуватися.

Підсумок теми: заряд ядра встановлює місце елемента в періодичній системі; електронна оболонка визначає характерні хімічні властивості; тип зв'язку та будова твердого тіла пояснюють низку властивостей речовин. Ці положення є теоретичною основою подальшого вивчення класів неорганічних сполук, розчинів і хімічних процесів у металевих матеріалах.

Питання для самоперевірки

1. Чим відрізняється хімічний елемент від простої речовини?
2. Чому ізотопи мають однаковий порядковий номер?
3. Як зовнішні електрони пов'язані з властивостями групи?
4. Чим відрізняються йонний та ковалентний зв'язки?
5. Чому твердий $NaCl$ не проводить струм, а його розплав проводить?
6. Які властивості металів пояснює металічний зв'язок?

Використані джерела

[1] Власенко Н. Є., Коваленко І. В., Потаскалов В. А. Хімія. Ч. 1. Загальна хімія. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. Розділи 2–3.

[2] Назарко І. С., Вічко О. І. Загальна хімія. Тернопіль: ТНТУ, 2019. Теми 2–3.

[3] Хоботова Е. Б. Загальна та неорганічна хімія. Ч. 1. Загальна хімія. Харків: ХНАДУ, 2023. Розділи 1–3.

[4] Петрушина Г. О., Пугач Л. І., Завріна С. В. Загальна та неорганічна хімія: навчальний посібник. Дніпропетровськ: Пороги, 2016. Розділ 1 «Загальна хімія».

[5] Степаненко О. М., Рейтер Л. Г., Ледовських В. М., Іванов С. В. Загальна та неорганічна хімія: у 2 частинах. Частина 1. Київ: Педагогічна преса, 2002. Розділи про атом, періодичну систему і хімічний зв'язок.

ТЕМА 3

ОСНОВНІ КЛАСИ НЕОРГАНІЧНИХ СПОЛУК ТА ЗАКОНОМІРНОСТІ ХІМІЧНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ

1. Класифікація неорганічних речовин та її практичне значення

Мета лекції. Систематизувати відомості про оксиди, основи, кислоти й солі; навчитися визначати клас речовини за формулою та передбачати найважливіші типи її хімічних перетворень.

План лекції

1. Прості й складні речовини. 2. Оксиди та їхні хімічні властивості. 3. Основи й амфотерні гідроксиди. 4. Кислоти та солі. 5. Реакції між класами речовин. 6. Генетичні зв'язки та приклади перетворень речовин.

1.1. Прості та складні речовини

Прості речовини утворені атомами одного хімічного елемента, а складні — атомами різних елементів. До простих речовин належать метали й неметали. Складні неорганічні речовини в навчальній класифікації поділяють на оксиди, основи, кислоти та солі. Окремо розглядають амфотерні сполуки, які можуть виявляти властивості і основ, і кислот.

Хімічну класифікацію використовують не лише для запам'ятовування назв. Вона дозволяє визначити, з якими речовинами можливі типові реакції, які продукти можуть утворюватися та які рівняння потрібні для кількісних розрахунків. Наприклад, знання про кислотний характер деяких оксидів допомагає пояснити їхню взаємодію з лугами; основний характер оксиду кальцію — його реакцію з водою та кислотами.



Рис. 3.1. Схема класифікації неорганічних речовин

За формулою спершу визначають набір елементів. Якщо речовина містить Оксиген і лише один інший елемент, її зазвичай відносять до оксидів. Якщо сполука містить гідроксильні групи OH, потрібно з'ясувати, чи є вона основою або амфотерним гідроксидом. Водневмісні кислоти містять атоми Гідрогену, які можуть заміщуватися на катіони металів; солі містять катіони й аніони кислотних залишків. Ці ознаки є вихідними навчальними правилами, але не описують усю різноманітність неорганічної хімії.

Джерела розділу: [1, с. 49–50]; [2, розд. 1]. [4, розд. про класи сполук]

2. Оксиди: класифікація та реакційні властивості

2.1. Поняття оксиду

Оксидами називають бінарні сполуки Оксигену з іншим елементом, у яких Оксиген має ступінь окиснення -2 . За характером хімічних властивостей розрізняють основні, кислотні, амфотерні та несолетворні оксиди. Віднесення до групи визначається реакціями речовини, а не лише тим, метал чи неметал входить до її складу: існують амфотерні оксиди металів і оксиди вищих ступенів окиснення з кислотними властивостями.

Таблиця 3.1. Хімічні групи оксидів та характерні ознаки

Група оксидів	Характерна ознака	Приклад
Основні	Реагують з кислотами	CaO, MgO
Кислотні	Реагують з лугами	SO ₃ , CO ₂
Амфотерні	Реагують з кислотами та сильними лугами	Al ₂ O ₃ , ZnO
Несолетворні	За звичайних умов не утворюють солей із кислотами та основами	CO, NO

2.2. Реакції оксидів

Основні оксиди можуть реагувати з кислотами з утворенням солі та води. Деякі основні оксиди активних металів взаємодіють із водою, утворюючи основи; наприклад, CaO перетворюється на Ca(OH)₂. Кислотні оксиди взаємодіють із лугами з утворенням солей; частина з них реагує з водою з утворенням відповідних кислот. Тому для правильного запису рівняння важливо знати конкретний оксид.



Амфотерні оксиди, зокрема Al₂O₃ та ZnO, можуть реагувати як із кислотами, так і з сильними лугами. На відміну від них, CO і NO в межах базової класифікації розглядають як несолетворні оксиди. Взаємодія оксидів між собою також може призводити до утворення солей: наприклад, основний оксид CaO взаємодіє з кислотним оксидом CO₂ з утворенням CaCO₃. Це один із найпростіших прикладів хімічного зв'язку між різними класами сполук.



Назва оксиду має відображати елемент і, якщо він виявляє декілька ступенів окиснення, його ступінь окиснення: FeO — ферум(II) оксид, Fe₂O₃ — ферум(III) оксид. У розрахунках саме правильна формула, а не лише словесна назва, визначає молярну масу та співвідношення реагентів.

Джерела розділу: [1, с. 50–52]; [2, розд. 1].

3. Основи та амфотерні гідроксиди

3.1. Склад і номенклатура основ

Основи — сполуки, які у спрощеному навчальному описі складаються з катіонів металів та гідроксид-іонів OH^- . Загальна формула для одновалентного катіона має вигляд MOH , для двовалентного — M(OH)_2 . Наприклад, NaOH називають натрій гідроксидом, а Ca(OH)_2 — кальцій гідроксидом. Основи, які добре розчиняються у воді, називають лугами. Не всі гідроксиди металів розчинні: Cu(OH)_2 і Fe(OH)_3 утворюють малорозчинні осад.

Найхарактернішою хімічною властивістю основ є реакція з кислотами — нейтралізація, у результаті якої утворюються сіль і вода. Розчинні основи можуть реагувати з кислотними оксидами; за відповідних умов вони можуть взаємодіяти з розчинами солей, якщо один із продуктів виводиться з розчину у вигляді осаду або іншого слабкодисоційованого продукту.



3.2. Амфотерні гідроксиди

Амфотерні гідроксиди можуть реагувати і з кислотами, і з надлишком сильного лугу. У початковому курсі типовими прикладами є Al(OH)_3 та Zn(OH)_2 . В кислому середовищі вони утворюють солі відповідних катіонів; у лужному середовищі за певних умов утворюють комплексні гідроксисполуки. Ця поведінка відображає проміжний характер деяких елементів і їхніх сполук.



Таблиця 3.2. Приклади гідроксидів у загальній класифікації

Група	Приклад	Характерна властивість
Розчинна основа (луг)	NaOH	Реагує з кислотами й кислотними оксидами
Малорозчинна основа	Cu(OH)_2	Утворює осад, взаємодіє з кислотами
Амфотерний гідроксид	Al(OH)_3	Реагує і з кислотами, і з надлишком лугу

Розчинність та можливі реакції не слід визначати лише за зовнішнім виглядом речовини. Для конкретного гідроксиду користуються таблицею розчинності й відомостями про хімічні властивості. Під час розв'язування задач спочатку складають рівняння, потім урівнюють його та лише після цього переходять до кількості речовини і мас.

Джерела розділу: [1, с. 52–54]; [3, розд. про елементи III групи].

4. Кислоти: склад, класифікація та реакції

4.1. Склад і назви кислот

Кислоти — сполуки, у яких містяться атоми Гідрогену, здатні заміщуватися катіонами металів, і кислотний залишок. За наявністю Оксигену їх поділяють на оксигеновмісні (H_2SO_4 , HNO_3) та безоксигенові (HCl , H_2S). За числом атомів Гідрогену, що можуть заміщуватися, розрізняють одно-, дво- й багатоосновні кислоти. Цей поділ не слід плутати зі силою кислоти: наприклад, одноосновні кислоти можуть бути як сильними, так і слабкими.

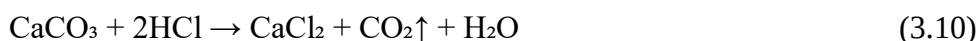
У водному розчині кислоти створюють кислотне середовище завдяки утворенню гідратованих іонів Гідрогену. Докладніше кислотність і водневий показник буде розглянуто в лекції про електроліти. Для цієї теми основне — навчитися розпізнавати кислоти за формулами та складати найпростіші рівняння їхніх реакцій.

4.2. Взаємодія кислот з іншими речовинами

Кислоти взаємодіють з основами та багатьма основними оксидами з утворенням солей і води. Для кислот-неокисників із достатньо активними металами характерне виділення водню; однак умови реакції залежать від природи металу, концентрації та властивостей конкретної кислоти. Концентрована нітратна та сульфатна кислоти можуть виявляти властивості окисників, тому загальну схему «метал + кислота $\rightarrow$ сіль + H_2 » застосовують не до всіх кислот.



Кислота може взаємодіяти із сіллю, якщо утворюється осад, газ або інший продукт, що сприяє перебігу реакції. Наприклад, карбонати з кислотами утворюють нестійку карбонатну кислоту, яка розкладається з виділенням CO_2 . За цим явищем у хімічному аналізі розпізнають карбонат-іони. Рівняння необхідно записувати з урахуванням складу солі та стехіометричних коефіцієнтів.



Під час класифікації кислот важливо користуватися відповідними назвами та формулами. Сульфатна кислота H_2SO_4 і сульфїтна кислота H_2SO_3 відрізняються складом, ступенем окиснення Сульфуру та властивостями. Аналогічно HNO_3 і HNO_2 — не одна й та сама речовина. Помилка в індексі змінює не лише назву, а й кількісні співвідношення в рівнянні реакції.

Джерела розділу: [1, с. 54–55]; [2, розд. 1].

5. Солі та їхня класифікація

5.1. Утворення солей

Солі утворені катіонами металів або амонію та аніонами кислотних залишків. Під час повної нейтралізації кислоти основою зазвичай утворюються середня сіль і вода. Якщо багатоосновна кислота нейтралізована не повністю, можливе утворення кислої солі; якщо

багатокислотна основа нейтралізована не повністю, може утворюватися основна сіль. Для розуміння цих відмінностей потрібно враховувати заряд йонів і склад формульної одиниці.

Найпоширеніші типи солей у початковому курсі — середні, кислі та основні. Середні солі: NaCl , CaCO_3 , Na_2SO_4 . Кислі солі: NaHCO_3 , NaHSO_4 . Основні солі містять гідроксильні групи поряд із кислотними залишками. Окремо виділяють подвійні та комплексні солі, однак докладний розгляд їхньої будови не є метою цієї теми.

Таблиця 3.3. Основні типи солей та приклади

Тип	Ознака	Приклад
Середня	У складі немає заміщуваного кислотного Н та гідроксильних ОН	Na_2SO_4
Кисла	У кислотному залишку збережено заміщуваний Н	NaHCO_3
Основна	Містить гідроксильні групи та кислотний залишок	$\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$

5.2. Хімічні властивості солей

Солі можуть реагувати з кислотами, основами, іншими солями або металами. Реакції обміну у водних розчинах найдоцільніше аналізувати з позиції утворення малорозчинної речовини, газу або слабого електроліту. Наприклад, під час змішування розчинів барій хлориду та натрій сульфату утворюється малорозчинний BaSO_4 . Саме утворення осаду є причиною практично повного перебігу цієї реакції.



Активніший метал може витіснити менш активний метал із розчину його солі за відповідних умов. Наприклад, цинк взаємодіє з розчином купрум(II) сульфату; цинк переходить у розчин як Zn^{2+} , а мідь виділяється у вигляді металу. Ця реакція є одночасно реакцією заміщення й окисно-відновним процесом. Вона не є типовим прикладом реакції йонного обміну, адже тут змінюються ступені окиснення елементів.



Розчинність солей слід перевіряти за таблицею, а не за аналогією з однією відомою сіллю. Нітрати зазвичай добре розчинні у воді, тоді як для сульфатів і карбонатів існують численні відмінності. Надалі ці відомості допоможуть складати йонні рівняння, пояснювати осадження сполук і розраховувати концентрації розчинів.

Джерела розділу: [1, с. 55–57]; [2, розд. 1].

6. Основні типи реакцій та умови їхнього перебігу

6.1. Реакції сполучення, розкладу, заміщення й обміну

За характером перерозподілу атомів у шкільному та початковому курсі розрізняють реакції сполучення, розкладу, заміщення й обміну. Під час сполучення з кількох реагентів утворюється один продукт; під час розкладу одна складна речовина утворює кілька продуктів. У реакції заміщення атоми простої речовини заміщують атоми елемента в складній речовині. Під час реакції обміну компоненти двох складних речовин взаємно обмінюються частинами.



Схеми класифікації дають змогу впорядкувати приклади, але самі по собі не гарантують перебігу реакції. Для прогнозування необхідно враховувати природу реагентів, їхній агрегатний стан, розчинність, температуру й інші умови. Для водних розчинів солей, кислот і основ корисне правило: реакція обміну відбувається практично до кінця, якщо серед продуктів утворюється осад, газ або слабкий електроліт, наприклад вода.

6.2. Молекулярні й скорочені йонні рівняння

Молекулярне рівняння записують формулами речовин. У повному йонному рівнянні сильні електроліти, наявні в розчині, зображають окремими йонами, тоді як осад, газ і слабкі електроліти записують без розкладання на йони. Йони, які однакові зліва і справа, скорочують. Отримане скорочене йонне рівняння показує сутність хімічного перетворення. Докладні правила дисоціації розглядатимемо в темі № 5.



Під час складання будь-якого рівняння перевіряють, чи збереглося число атомів кожного елемента, а для йонних рівнянь — також сумарний електричний заряд. Наприклад, у реакції утворення AgCl сума зарядів іонів зліва дорівнює нулю, справа продукт нейтральний. Для нейтралізації один катіон H^+ реагує з одним аніоном OH^- з утворенням однієї молекули води.

Рівняння реакцій є основою розрахунків мас і кількостей речовин. Після визначення класу реагенту студенти мають знайти можливі продукти, перевірити умови реакції та урівняти рівняння; лише після цього можна виконувати стехіометричні перетворення. Зворотний порядок часто призводить до неправильних результатів навіть за правильно підставлених числових даних.

Джерела розділу: [1, с. 49–59]; [2, розд. 1]. [5, розд. про хімічні реакції]

7. Генетичний зв'язок між класами неорганічних сполук

7.1. Взаємні перетворення простих та складних речовин

Генетичним зв'язком називають можливість переходу між різними класами неорганічних сполук у послідовності реакцій. Для металів типовим навчальним ланцюжком є

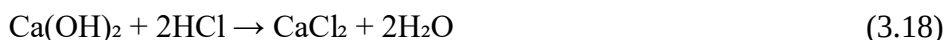
«метал — основний оксид — основа — сіль», а для багатьох неметалів — «неметал — кислотний оксид — кислота — сіль». Це узагальнення: деякі оксиди не реагують із водою, не всі відповідні гідроксиди можна отримати прямим способом.



Рис. 3.2. Генетичні зв'язки між основними класами неорганічних сполук

7.2. Приклади послідовних перетворень

Розглянемо кальцій. Під час його реакції з киснем утворюється CaO ; оксид кальцію взаємодіє з водою, утворюючи Ca(OH)_2 ; після нейтралізації хлоридною кислотою одержують CaCl_2 . Усі три реакції відносяться до різних типів хімічних перетворень, але об'єднані спільним елементом Кальцієм, який зберігається у складі продуктів.



Для неметалу можна розглянути сірку: під час горіння утворюється SO_2 , який у воді утворює розчин сульфітної кислоти; її взаємодія з лугом може дати сульфід натрію. У розчинах рівновага за участю SO_2 , води та йонів складніша за шкільну схему, тому нижче наведено спрощений формальний запис, придатний для початкового розуміння класів сполук.



Спостерігаючи перетворення оксидів металів, слід враховувати, що вони можуть бути не лише основними. Алюміній утворює амфотерний Al_2O_3 , тому для нього просте правило «оксид + вода → основа» непридатне. У технологіях металів реакції утворення та руйнування оксидних плівок мають важливе значення, але реальні процеси можуть залежати від температури, складу атмосфери й захисних середовищ.

Джерела розділу: [1, с. 57–59]; [3, розд. про оксиди та гідроксиди].

8. Застосування класифікації та підготовка до наступних тем

8.1. Приклад характеристики речовини за формулою

Щоб охарактеризувати речовину, встановлюють її якісний склад, визначають належність до класу, правильно називають сполуку, а потім перелічують типові для цього класу реакції. Наприклад, для Fe_2O_3 визначають відношення кількості атомів Феруму й Оксигену як 2:3 та ступені окиснення +3 і -2. Після цього можна записати реакцію ферум(III) оксиду з кислотою та визначити стехіометричні коефіцієнти.



В аналогічному порядку розглядають CaCO_3 : це середня сіль карбонатної кислоти. У реакції з хлоридною кислотою вона утворює CaCl_2 , CO_2 і H_2O . Якщо маса карбонату відома, за урівняним рівнянням можна визначити кількість утвореного газу. Тут матеріал теми № 3 безпосередньо поєднується з розрахунками теми № 1.

Особливе значення для подальших спеціалізованих тем мають хімічні властивості оксидів металів. Під час нагрівання та зварювання на металевій поверхні можливе утворення оксидів, а під час хімічного очищення використовують реакції з кислотами та іншими засобами. Який реагент обрати для конкретного сплаву — окреме технологічне питання, для якого знання класу речовини є необхідним, але не достатнім.

Отже, система класів неорганічних сполук є способом упорядкувати хімічні властивості та спрогнозувати найтипівіші напрямки реакцій. Під час вивчення розчинів та електролітів ми повернемося до тих самих кислот, основ і солей, але розглядатимемо їх уже як частинки у водному середовищі, з урахуванням дисоціації та кислотності.

Питання для самоперевірки

1. Які речовини називають оксидами і як їх класифікують?
2. Чим луг відрізняється від малорозчинної основи?
3. Що таке амфотерність і які сполуки її виявляють?
4. Які солі називають середніми та кислими?
5. За яких умов реакції обміну в розчині перебігають практично до кінця?
6. Які перетворення утворюють генетичний ряд металу?

Використані джерела

- [1] Назарко І. С., Вічко О. І. Загальна хімія. Тернопіль: ТНТУ, 2019. Тема 4.
- [2] Булавін В. І. та ін. Практикум з основ загальної хімії. Харків: НТУ «ХП», 2017. Розділ «Основні класи неорганічних сполук».
- [3] Хоботова Е. Б. Загальна та неорганічна хімія. Ч. 2. Неорганічна хімія. Харків: ХНАДУ, 2026. Розділи про сполуки елементів.
- [4] Петрушина Г. О., Пугач Л. І., Завріна С. В. Загальна та неорганічна хімія: навчальний посібник. Дніпропетровськ: Пороги, 2016. Розділи про основні класи неорганічних сполук.

[5] Степаненко О. М., Рейтер Л. Г., Ледовських В. М., Іванов С. В. Загальна та неорганічна хімія: у 2 частинах. Частина 1. Київ: Педагогічна преса, 2002. Розділи про хімічні перетворення та основні класи сполук.

ТЕМА 4

РОЗЧИНИ ТА СПОСОБИ ВИРАЖЕННЯ ЇХ СКЛАДУ

1. Розчини: склад, будова та класифікація

Мета лекції. Пояснити природу розчинів, способи вираження їхнього складу та послідовність переходів між масою, кількістю речовини й об'ємом під час простих технічних розрахунків.

План лекції

1. Поняття про розчини та механізм розчинення. 2. Розчинність і насичення. 3. Масова та мольна частки. 4. Молярна і моляльна концентрації. 5. Розбавлення та змішування. 6. Розрахунки складу технологічних розчинів.

1.1. Розчин і його компоненти

Розчин — однорідна система змінного складу, що містить два або більше компонентів. Речовину, яка зазвичай присутня у більшій кількості та визначає агрегатний стан системи, називають розчинником; інші компоненти — розчиненими речовинами. У водних розчинах розчинником є вода. Залежно від агрегатного стану розрізняють газоподібні, рідкі й тверді розчини. Металеві сплави можуть утворювати тверді розчини, хоча їхню будову докладніше розглядають у матеріалознавстві.

Водні розчини мають особливе значення в хімії та техніці: у них проводять численні реакції, готують допоміжні технологічні середовища, здійснюють очищення й промивання деталей. Для розрахунку складу використовують кількісні величини — масу, об'єм, кількість речовини, густину та різні способи вираження концентрації. Конкретний спосіб обирають за тим, які вихідні дані відомі та яке виробниче або навчальне завдання потрібно виконати.

1.2. Однорідність і розподіл речовини

В істинному розчині розчинена речовина розподілена на молекулярному або йонному рівні. Зовні такий розчин є однорідним, хоча його властивості змінюються зі складом і температурою. Суміш із великими твердими частинками, які осідають, не є істинним розчином: вона належить до дисперсних систем, наприклад суспензій. Аналогічно не слід ототожнювати емульсію з молекулярним розчином.

Поняття «концентрований» і «розведений» дають лише якісну характеристику. Щоб однозначно описати розчин, потрібно вказати числове значення частки або концентрації. Наприклад, два «розведені» розчини можуть істотно різнитися за вмістом речовини, а однакова масова частка не означає однакової молярної концентрації для сполук із різними молярними масами.

Джерела розділу: [1, с. 77–78]; [2, розд. «Розчини»].

2. Механізм розчинення, розчинність та насичення

2.1. Фізико-хімічна природа розчинення

Розчинення пов'язане з руйнуванням частини взаємодій між частинками речовини та виникненням нових взаємодій між розчиненою речовиною і розчинником. Для водних розчинів взаємодію частинок із молекулами води називають гідратацією, у загальному випадку — сольватацією. Ці явища визначають можливість розчинення й впливають на тепловий ефект процесу. Розчинення не обов'язково супроводжується нагріванням: залежно від природи речовини й умов теплота може як виділятися, так і поглинатися.

Під час розчинення йонного кристала полярні молекули води орієнтуються біля катіонів та аніонів. Унаслідок гідратації йони можуть переходити з кристала в розчин. Для молекулярних полярних речовин важливими є взаємодії між молекулами розчинника й розчиненої речовини; для деяких сполук розчинення супроводжується також хімічною реакцією з водою. Не кожна кристалічна йонна сполука легко розчиняється: істотне значення має співвідношення енергій руйнування ґратки та взаємодії з водою.

2.2. Насичені, ненасичені та пересичені розчини

Розчинність відображає максимальну кількість речовини, яка за заданих умов може перебувати в розчині у стані рівноваги з нерозчиненою фазою. Ненасичений розчин здатний розчинити додаткову кількість цієї речовини, насичений перебуває в рівновазі з надлишком, а пересичений містить більше розчиненої речовини, ніж відповідає рівноважній розчинності за тих самих умов, і може бути нестійким.

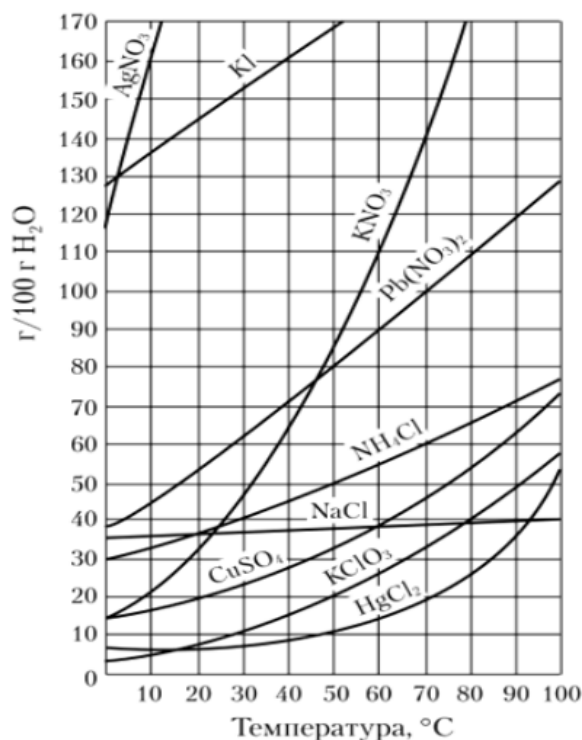


Рис. 4.1. Криві розчинності деяких твердих речовин у воді

Для багатьох твердих речовин розчинність із підвищенням температури зростає, проте це не універсальне правило. Вплив температури для конкретної речовини встановлюють за експериментальними даними або графіком. Для газів у воді за багатьох умов підвищення температури зменшує розчинність, тоді як збільшення парціального тиску газу, як правило, сприяє її зростанню. Розчинність потрібно відрізнити від швидкості розчинення: перемішування прискорює встановлення рівноваги, але за незмінних умов не обов'язково змінює граничну розчинність.

Джерела розділу: [1, с. 77–80]; [2, розд. «Розчини», графік розчинності].

3. Масова частка розчиненої речовини

3.1. Визначення масової частки

Масова частка розчиненої речовини — відношення її маси до загальної маси розчину. Цю величину позначають ω або w та виражають часткою одиниці чи у відсотках. Загальна маса розчину дорівнює сумі мас усіх його компонентів. Якщо розчин складається тільки з води й однієї розчиненої речовини, для обчислення маси води достатньо від маси розчину відняти масу речовини. Під час запису розрахунку потрібно чітко розрізняти масу речовини та масу всього розчину.

$$w = m(\text{речовини}) / m(\text{розчину}) \quad (4.1)$$

$$w, \% = w \cdot 100 \% \quad (4.2)$$

$$m(\text{розчину}) = m(\text{речовини}) + m(\text{розчинника}) \quad (4.3)$$

3.2. Зворотні розрахунки

Якщо масова частка й загальна маса розчину відомі, масу розчиненої речовини знаходять множенням цих величин. Наприклад, у 200 г 10%-го водного розчину міститься 20 г розчиненої речовини й 180 г води. Важливо, що 10% під час підстановки у формулу перетворюють на 0,10. У разі використання різних одиниць маси спочатку потрібно перевести їх до однієї системи.

$$m(\text{речовини}) = w \cdot m(\text{розчину}) \quad (4.4)$$

Масова частка не залежить від способу подання маси: можна працювати з грамами, кілограмами або іншими одиницями за умови їхньої узгодженості. Якщо в технологічному описі наведено густину, з неї можна знайти масу заданого об'єму розчину. Але для цього густина має відповідати саме концентрації та температурі розчину, з яким виконують обчислення.

$$m(\text{розчину}) = \rho \cdot V(\text{розчину}) \quad (4.5)$$

Масові частки компонентів багатокомпонентного розчину в сумі дорівнюють одиниці, якщо враховано всі його складові. Це дає простий засіб перевірки правильності розрахунків: після визначення часток розчинених речовин частка води має бути різницею між одиницею та сумою решти часток.

$$\Sigma w_i = 1 \quad (4.6)$$

У завданнях на приготування розчинів масову частку використовують як основу матеріального балансу. Саме відомості про необхідну масу активної речовини дозволяють далі визначити масу вихідного концентрату, води та загальну масу готового продукту. Для речовин, які поглинають воду з повітря або утворюють кристалогідрати, до розрахунку вводять фактичний склад використовуваного реагенту.

Джерела розділу: [1, с. 79–80]; [2, розд. «Розчини»]. [4, розд. про розчини]

4. Мольна частка і молярна концентрація

4.1. Мольна частка

Мольна частка компонента дорівнює відношенню кількості речовини цього компонента до сумарної кількості речовини всіх компонентів розчину. На відміну від масової частки, тут порівнюють молі, а не грами. Для двокомпонентного розчину мольні частки розчинника та розчиненої речовини в сумі дорівнюють одиниці. Цю характеристику часто використовують для опису фізико-хімічних властивостей розчинів.

$$x_i = n_i / \Sigma n_i \quad (4.7)$$

$$\Sigma x_i = 1 \quad (4.8)$$

4.2. Молярна концентрація

Молярна концентрація C показує, скільки молів розчиненої речовини міститься в одному літрі розчину. Її одиниця — моль/л. Під час підготовки навчального розчину за відомими концентрацією й кінцевим об'ємом спочатку обчислюють кількість речовини, а потім — масу реагенту за його молярною масою. При цьому об'єм у формулі виражають у літрах; величину у мілілітрах необхідно поділити на 1000.

$$C = n / V(\text{розчину}) \quad (4.9)$$

$$m(\text{речовини}) = C \cdot V(\text{розчину}) \cdot M \quad (4.10)$$

Наприклад, для одержання 1,0 л розчину NaCl з молярною концентрацією 0,10 моль/л потрібно взяти 0,10 моль солі, що за молярної маси приблизно 58,5 г/моль відповідає 5,85 г. Далі речовину розчиняють і доводять об'єм розчину до заданого значення. Важливо: літр готового розчину і літр води — не тотожні об'єми, оскільки після розчинення загальний об'єм може змінитися.

Таблиця 4.1. Порівняння основних способів вираження складу

Величина	Що порівнюють	Одиниця
Масова частка w	Маса компонента / маса розчину	Частка або %
Мольна частка x	Молі компонента / сумарні молі	Частка одиниці

Величина	Що порівнюють	Одиниця
Молярна концентрація C	Молі речовини / об'єм розчину	моль/л
Моляльність b	Молі речовини / маса розчинника	моль/кг

На відміну від масової частки, молярна концентрація залежить від температури через зміну об'єму розчину. Тому під час точних вимірювань і порівнянь слід враховувати температуру; для простих навчальних задач вона задається або її впливом нехтують за умовою. Поняття молярної концентрації необхідне для розрахунку реакцій у розчинах та нейтралізації.

Джерела розділу: [1, с. 79–80]; [3, розд. 7].

5. Моляльність, густина та переходи між характеристиками

5.1. Моляльна концентрація (моляльність)

Моляльність b — це кількість молів розчиненої речовини на один кілограм розчинника. Її не слід плутати з молярною концентрацією: у знаменнику молярності — об'єм усього розчину в літрах, а у знаменнику моляльності — маса саме розчинника в кілограмах. Моляльність не залежить безпосередньо від теплового розширення об'єму, тому її зручно використовувати під час опису деяких властивостей розчинів.

$$b = n(\text{речовини}) / m(\text{розчинника, кг}) \quad (4.11)$$

Наприклад, якщо в 1 кг води розчинено 0,5 моль речовини, моляльність становить 0,5 моль/кг. У навчальних завданнях обчислення моляльності починають із визначення маси води, а не маси розчину. Якщо задано масову частку, масу води знаходять із різниці загальної маси розчину та маси розчиненої речовини.

5.2. Зв'язок масової частки, густини та молярності

За відомими масовою часткою w , густиною ρ та молярною масою M можна перейти до молярної концентрації. Спершу визначають масу одного літра розчину за його густиною, потім обчислюють масу речовини в цьому літрі і ділять її на молярну масу. Якщо густина задана в г/мл, маса одного літра розчину становить 1000ρ грамів. Отже, формула перерахунку потребує узгоджених одиниць.

$$C = 1000 \cdot \rho \cdot w / M \quad (4.12)$$

Тут C — у моль/л, ρ — у г/мл, w — частка одиниці, M — у г/моль. Якщо замість частки задано масовий відсоток, його потрібно попередньо поділити на 100. Наприклад, для 10%-го розчину речовини з відомими густиною та молярною масою обчислення починають із $w = 0,10$; підстановка числа 10 замість 0,10 створила б стократну помилку.

Зворотне обчислення масової частки проводять за відомими C , M і ρ . Воно є корисним, коли в навчальному завданні одна частина вихідних даних задана як молярність, а інша — як

масова частка. Однак для реального розчину густина сама може залежати від концентрації, тому в точних задачах використовують відповідні експериментальні таблиці.

$$w = C \cdot M / (1000 \cdot \rho) \quad (4.13)$$

Для розв'язування практичних задач студент має спочатку записати, які величини відомі, перевірити одиниці і лише тоді обирати формулу. Цей простий порядок запобігає механічному змішуванню маси розчину та маси води або використанню мілілітрів у формулі, що вимагає літрів.

Джерела розділу: [2, розд. «Розчини»]; [3, розд. 7]. [5, розд. «Розчини»]

6. Розбавлення розчинів і матеріальний баланс

6.1. Розбавлення водою

Під час розбавлення до розчину додають розчинник. Якщо розчинена речовина не втрачається, її маса до та після розбавлення залишається однаковою. Це дозволяє знайти невідомі маси без жодних складних фізико-хімічних моделей. Позначивши масові частки початкового й кінцевого розчинів як w_1 і w_2 , а їхні маси як m_1 і m_2 , дістанемо основне рівняння матеріального балансу.

$$w_1 \cdot m_1 = w_2 \cdot m_2 \quad (4.14)$$

$$m(\text{доданої води}) = m_2 - m_1 \quad (4.15)$$

Наприклад, із 200 г 10%-го розчину потрібно одержати 5%-й. Початковий розчин містить 20 г речовини. Для отримання 5%-го розчину кінцева маса має становити 400 г, отже, потрібно додати 200 г води. Під час розбавлення масова частка зменшується, але маса розчиненої речовини не змінюється. Перевірка: 20 г із 400 г — це 0,05, або 5%.

6.2. Розбавлення за молярною концентрацією

Якщо об'єм початкового розчину та його молярна концентрація відомі, кількість речовини становить $n = C_1 V_1$. Після додавання розчинника за відсутності реакції та втрат моли речовини зберігаються, тому $C_1 V_1 = C_2 V_2$. У цій формулі об'єми повинні бути в однакових одиницях, а концентрації — у моль/л. Важливо, що розраховують потрібний кінцевий об'єм розчину, а не просто об'єм води для доливання.

$$C_1 \cdot V_1 = C_2 \cdot V_2 \quad (4.16)$$

Якщо потрібно приготувати розчин із концентрату, послідовність дій така: обчислюють кількість або масу цільової речовини, визначають необхідну кількість концентрату й після цього одержують заданий кінцевий об'єм. Формула $C_1 V_1 = C_2 V_2$ не описує змішування двох реагентів, які вступають у хімічну реакцію; у такому випадку спочатку складають рівняння реакції та матеріальний баланс.

Під час використання масових часток завжди працюють із масами; під час розведення за молярністю — з кількостями речовини та об'ємами готових розчинів. Перехід між цими

способами можливий лише за наявності додаткових відомостей, зокрема густини та молярної маси.

Джерела розділу: [1, с. 79–80]; [2, розд. «Розчини»].

7. Змішування розчинів різної концентрації

7.1. Баланс розчиненої речовини

Під час змішування двох розчинів однієї й тієї самої речовини без хімічної реакції маса цієї речовини в кінцевому розчині дорівнює сумі її мас в обох вихідних розчинах. Загальна маса кінцевого розчину дорівнює сумі мас вихідних розчинів за відсутності втрат. Звідси одержують формулу масової частки суміші. Ця формула придатна незалежно від того, чи додають до концентрованого розчину воду, чи змішують два розчини з різним вмістом речовини.

$$w(\text{суміші}) = (w_1 m_1 + w_2 m_2) / (m_1 + m_2) \quad (4.17)$$

Наприклад, змішали 100 г 10%-го розчину та 200 г 20%-го розчину однієї речовини. Маса речовини в першій порції — 10 г, у другій — 40 г. Разом у 300 г отриманого розчину міститься 50 г речовини. Кінцева масова частка становить приблизно 16,7%. Результат лежить між вихідними концентраціями — це додаткова перевірка правдоподібності.

7.2. Перевірка умов задачі

У розрахунку сумішей треба звертати увагу на агрегатний стан і хімічну сумісність компонентів. Якщо в процесі змішування утворюється осад, виділяється газ або відбувається інша реакція, просте додавання мас розчиненої речовини вже не описує фактичний кінцевий склад. Аналогічно для сумішей із випаровуванням або іншими втратами до балансу вводять відповідні додаткові члени.

Часто під час підготовки розчину використовують концентрат, у якому активна речовина становить лише частину маси. У цьому випадку спочатку знаходять потрібну масу активної речовини, далі визначають масу концентрату за відомою часткою речовини в ньому. Для остаточного розчину потрібно врахувати всі компоненти, включно з водою, яка вже містилася у концентраті.

$$m(\text{концентрату}) = m(\text{активної речовини}) / w(\text{концентрату}) \quad (4.18)$$

Прості масові баланси використовують у різних виробничих ситуаціях — від приготування мийного розчину до коригування концентрації технічної рідини. В навчальній задачі вихідні дані слід підбирати так, щоб студент міг окремо перевірити масу активної речовини, масу води й масу кінцевої суміші.

Джерела розділу: [1, с. 79–80]; [2, розд. «Розчини»].

8. Узагальнена послідовність розрахунку складу розчину

8.1. Алгоритм вибору величини та формули

Насамперед з умови визначають, що саме потрібно знайти: масу реагенту, масу розчинника, об'єм готового розчину, молярну концентрацію або масову частку. Якщо задані маси, зручним початком є масовий баланс; якщо задані молі й об'єм готового розчину, — молярна концентрація; якщо потрібно зіставити кількість речовини та масу розчинника, — молярність. В одній задачі можуть послідовно використовуватися декілька способів вираження складу, але їхні знаменники необхідно весь час розрізняти.

Для прикладу уявімо підготовку заданої маси водного робочого розчину з концентрату. Спершу за необхідною масовою часткою знаходять масу активної речовини; далі за її вмістом у концентраті — потрібну масу концентрату; потім за загальною масою готового розчину — масу води, яку слід додати. Якщо умова потребує молярності й містить густину, масу готового розчину переводять в об'єм та обчислюють молі активної речовини.

Перевіряють результати зворотною підстановкою. Сума мас концентрату та доли тої води повинна дорівнювати заданій загальній масі, а маса активної речовини, поділена на масу розчину, — заданій масовій частці. Для молярної концентрації перевіряють, чи отримано число молів на літр готового розчину, а не на літр окремо взятої води.

Під час роботи з технічними розчинами отримані навчальні обчислення не замінюють відомостей про хімічну сумісність реагентів, тепловиділення та інші умови безпечного приготування. У цій лекції розглянуто саме кількісні характеристики, тоді як електролітична дисоціація, кислотно-основні взаємодії й рН є темою наступної лекції.

Питання для самоперевірки

1. Чим істинний розчин відрізняється від суспензії?
2. Чим насичений розчин відрізняється від ненасиченого?
3. У чому відмінність між масовою часткою, молярністю та молярністю?
4. Чому не можна прирівнювати літр води до літра готового розчину?
5. Яка величина зберігається під час звичайного розбавлення без реакції?
6. Які вихідні дані потрібні для перерахунку масової частки в молярну концентрацію?

Використані джерела

- [1] Назарко І. С., Вічко О. І. Загальна хімія. Тернопіль: ТНТУ, 2019. Тема 6.
- [2] Хоботова Е. Б. Загальна та неорганічна хімія. Ч. 1. Загальна хімія. Харків: ХНАДУ, 2023. Розділ «Розчини».
- [3] Власенко Н. Є., Коваленко І. В., Потаскалов В. А. Хімія. Ч. 1. Загальна хімія. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. Розділ 7 «Розчини».
- [4] Петрушина Г. О., Пугач Л. І., Завріна С. В. Загальна та неорганічна хімія: навчальний посібник. Дніпропетровськ: Пороги, 2016. Розділ 1 «Загальна хімія»: розчини.

[5] Степаненко О. М., Рейтер Л. Г., Ледовських В. М., Іванов С. В. Загальна та неорганічна хімія: у 2 частинах. Частина 1. Київ: Педагогічна преса, 2002. Розділ «Розчини».

ТЕМА 5

ЕЛЕКТРОЛІТИ, КИСЛОТНО-ОСНОВНІ ПРОЦЕСИ ТА pH ТЕХНОЛОГІЧНИХ СЕРЕДОВИЩ

1. Електроліти та хімічні процеси у водних розчинах

Мета лекції. Пояснити електролітичну дисоціацію та кислотно-основні реакції, навчитися розрізняти сильні й слабкі електроліти та виконувати прості розрахунки водневого показника й нейтралізації.

План лекції

1. Електроліти та неелектроліти. 2. Механізм і ступінь дисоціації. 3. Кислоти, основи та йонні реакції. 4. Йонний добуток води й водневий показник. 5. Індикатори. 6. Гідроліз солей. 7. Застосування pH у навчальних прикладах технологічних середовищ.

1.1. Що таке електроліти

Електроліти — речовини, водні розчини або розплави яких проводять електричний струм завдяки руху йонів. До них належать багато кислот, основ і солей. Неелектроліти під час розчинення не створюють достатньої кількості вільних йонів, щоб забезпечити характерну для електролітів йонну провідність; типовий приклад — розчин сахарози у воді. Електропровідність залежить також від концентрації, температури й рухливості йонів, тому однакові за масовою часткою розчини різних солей можуть проводити струм по-різному.

У твердому кристалі NaCl йони займають відносно фіксовані положення у ґратці, тому вільного перенесення заряду немає. Після розплавлення або розчинення у воді йони стають рухливими й можуть переміщуватися під дією електричного поля. У розчині молекулярного неелектроліту частинки, навпаки, переважно залишаються електронейтральними молекулами. Ця відмінність лежить в основі навчального поділу розчинів.

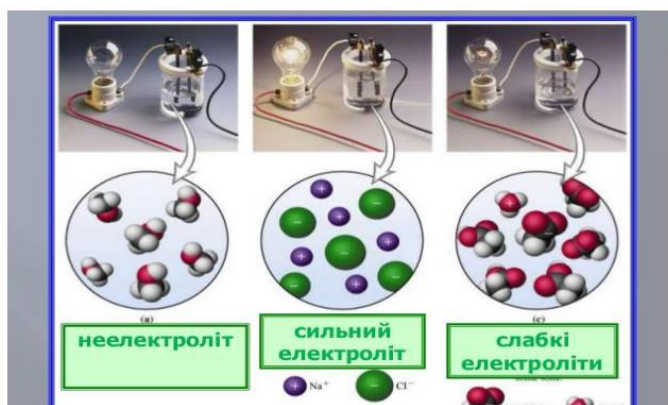


Рис. 5.1. Порівняння розчинів електролітів та неелектролітів

Поняття електролітичної дисоціації необхідне для пояснення хімічних реакцій у водних розчинах: молекулярне рівняння не завжди відображає, які частинки безпосередньо взаємодіють. Наприклад, під час нейтралізації розведених розчинів сильної кислоти й сильного лугу основною реакцією є взаємодія йонів Гідрогену та гідроксид-йонів з утворенням води. Інші йони, якщо вони не беруть безпосередньої участі в реакції, залишаються у розчині.

Джерела розділу: [1, с. 85–87]; [3, розд. 8].

2. Механізм електролітичної дисоціації

2.1. Дисоціація йонних і полярних сполук

Під час розчинення кристалічної солі полярні молекули води орієнтуються біля її катіонів і аніонів. Взаємодія молекул води з йонами послаблює притягання йонів у кристалі й сприяє переходу частинок у розчин. Кожний йон оточується гідратною оболонкою; саме гідратовані йони є переносниками електричного заряду в розчині. Сольватація в інших розчинниках підпорядковується подібним загальним принципам, але її ефективність залежить від властивостей розчинника.

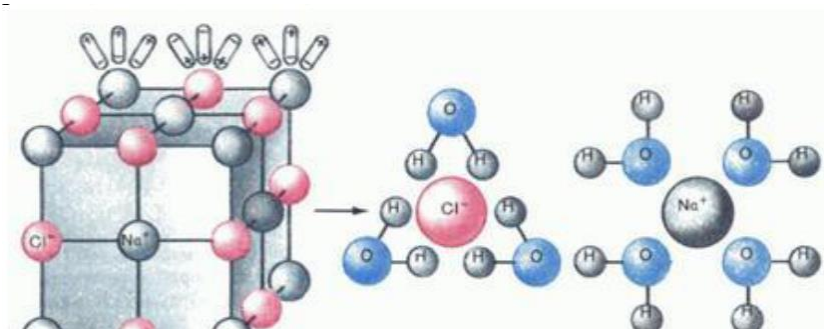


Рис. 5.2. Схема гідратації йонів у водному розчині

Для полярних молекулярних електролітів унаслідок взаємодії з водою можуть утворюватися йони. Зокрема, хлороводень, потрапляючи у воду, передає протон молекулі H_2O ; точнішим записом є утворення гідроній-іона H_3O^+ . У багатьох початкових розрахунках для стислості використовують $\text{H}^+(\text{водн.})$, розуміючи його як умовне позначення гідратованого протона, а не окремого «голого» йона в розчині.



Реакцію дисоціації сильної солі в навчальному записі можна подати стрілкою вправо: $\text{NaCl} \rightarrow \text{Na}^+ + \text{Cl}^-$. Для слабкої кислоти, наприклад етанової (оцтової), між недисоційованими молекулами та йонами встановлюється рівновага. Саме тому її формулу дисоціації записують оборотною стрілкою. Кількість йонів у розчині залежить від природи речовини, концентрації, температури й властивостей розчинника.



Кількість катіонів і аніонів, що виникають під час дисоціації, визначають індексами у хімічній формулі та зарядом йонів. Наприклад, формульна одиниця кальцій хлориду дає один Ca^{2+} та два Cl^- . Сумарний позитивний і негативний заряд у розчині врівноважуються, що є додатковою перевіркою правильності записаного рівняння.



Джерела розділу: [1, с. 85–88]; [2, розд. «Електролітична дисоціація»]. [4, розд. про дисоціацію]

3. Сильні та слабкі електроліти

3.1. Ступінь дисоціації

Електроліти поділяють за ступенем дисоціації на сильні й слабкі. Сильні електроліти в розведених водних розчинах у навчальній моделі розглядають як практично повністю дисоційовані; слабкі дисоціюють частково. Ступінь дисоціації α — це відношення кількості частинок, які розпалися на йони, до початкової кількості відповідних частинок речовини. Його записують як частку одиниці або у відсотках.

$$\alpha = n(\text{дисоційованих частинок}) / n(\text{початкових частинок}) \quad (5.4)$$

$$\alpha, \% = \alpha \cdot 100 \% \quad (5.5)$$

Наприклад, якщо зі 100 умовних молекул слабкої кислоти на йони розпалися 5, ступінь дисоціації в такій спрощеній моделі становить 0,05, або 5%. Для сильних електролітів реальні концентровані розчини можуть відхилятися від ідеальної моделі через міжйонні взаємодії; тому висновок «ступінь дисоціації близький до одиниці» не означає, що для будь-якої концентрації можна без похибки замінити активності йонів їхніми молярними концентраціями.

3.2. Приклади груп електролітів

Таблиця 5.1. Навчальна класифікація електролітів

Група	Приклади	Характеристика
Сильні кислоти	HCl, HNO ₃	У розведеній воді практично повна дисоціація
Сильні основи	NaOH, KOH	Дають гідроксид-іони
Більшість розчинних солей	NaCl, KNO ₃	У воді утворюють катіони й аніони
Слабкі кислоти	CH ₃ COOH, H ₂ CO ₃	Часткова дисоціація
Слабкі основи	Водний розчин аміаку	Часткове утворення OH ⁻

У розчині слабкої кислоти існують і молекули кислоти, і утворені йони. Для простого однопротонного електроліту рівновага описується константою кислотної дисоціації K_a . На рівні ФМБ достатньо знати фізичний зміст константи: за заданої температури вона характеризує схильність кислоти до дисоціації. Розрахунки кислотно-основної рівноваги для багатокомпонентних розчинів виходять за межі цієї теми.

$$K_a = [H^+] \cdot [A^-] / [HA] \quad (5.6)$$

Зі зменшенням початкової концентрації слабого електроліту ступінь його дисоціації зазвичай зростає. Проте загальна концентрація розчинених частинок одночасно може зменшуватися. Тому не можна ототожнювати високий ступінь дисоціації з високою загальною концентрацією йонів. Ці відмінності важливі для подальшого пояснення електропровідності та кислотності розчинів.

Джерела розділу: [1, с. 86–89]; [2, розд. «Електролітична дисоціація»].

4. Кисотно-основні реакції та нейтралізація

4.1. Кислоти й основи у водному розчині

У початковій теорії електролітичної дисоціації кислоти характеризують як речовини, які під час дисоціації утворюють у воді йони Гідрогену, а основи — як речовини, які утворюють гідроксид-іони. Для реакцій у водному середовищі корисно розглядати перенесення протона від кислоти до основи. У будь-якому випадку рівняння необхідно записувати з урахуванням фактичних частинок, присутніх у розчині, і умов конкретної реакції.

Для сильних кислоти й основи прикладом є взаємодія HCl з NaOH. У молекулярній формі рівняння показує утворення натрій хлориду та води. У повному йонному рівнянні Na^+ і Cl^- присутні в обох частинах, тому після скорочення залишається сутність нейтралізації — взаємодія $\text{H}^+(\text{водн.})$ з OH^- . Вода є слабким електролітом, тому її не розкладають на йони в скороченому йонному рівнянні.



4.2. Стехіометрія нейтралізації

Розрахунок необхідної кількості лугу для нейтралізації починають із рівняння реакції, оскільки коефіцієнти залежать від основності кислоти та кількості гідроксильних груп основи. Для однопротонної кислоти HCl і однокислотної основи NaOH співвідношення молів становить 1:1. Якщо задані молярні концентрації й об'єми їхніх розчинів, то в точці стехіометричної нейтралізації кількості молів мають бути рівними.



Для сульфатної кислоти рівняння повної нейтралізації має інші коефіцієнти: один моль H_2SO_4 відповідає двом молям NaOH. Тому в найпростішому випадку на один моль кислоти потрібно два молі лугу. Формулу для кислоти й лугу з одиничним співвідношенням не можна механічно застосовувати до всіх кислотно-основних реакцій без перевірки рівняння.



У разі повної нейтралізації сильних кислоти й основи в достатньо розведеному розчині за температури близько 25 °C pH зазвичай близький до 7. Проте для солей слабких кислот або слабких основ можливий гідроліз, через що середовище після формальної нейтралізації може бути кислим або лужним. Це стане зрозумілим після розгляду йонного добутку води та гідролізу солей.

Джерела розділу: [1, с. 85–91]; [3, розд. 8].

5. Йонний добуток води та показник рН

5.1. Дисоціація води

Вода є дуже слабким електролітом: невелика частина її молекул бере участь у рівноважному утворенні гідроній-іонів та гідроксид-іонів. За температури 25 °С у чистій воді молярні концентрації $\text{H}^+(\text{водн.})$ та OH^- однакові й становлять приблизно 10^{-7} моль/л у початковому наближенні. Добуток цих концентрацій називають йонним добутком води. Для реальних концентрованих розчинів точніші обчислення ведуть через активності, але в базових навчальних задачах користуються концентраційною моделлю.

$$K_v = [\text{H}^+] \cdot [\text{OH}^-] \approx 1,0 \cdot 10^{-14} \quad (25 \text{ }^\circ\text{C}) \quad (5.11)$$

5.2. Водневий показник рН

Щоб не записувати дуже малі концентрації катіонів Гідрогену з багатьма нулями, використовують водневий показник рН. У спрощеній навчальній моделі рН дорівнює від'ємному десятковому логарифму молярної концентрації H^+ . Для точного фізико-хімічного опису рН пов'язують з активністю йонів, однак для достатньо розведених розчинів сильної кислоти та сильного лугу початковий розрахунок через концентрації є прийнятним.

$$\text{pH} = -\lg[\text{H}^+] \quad (5.12)$$

Якщо концентрація катіонів Гідрогену становить 10^{-3} моль/л, рН у цій моделі дорівнює 3. Чим більшою є концентрація H^+ , тим меншим є рН. За температури 25 °С для нейтрального водного розчину рН близький до 7, для кислого — нижчий за 7, для лужного — вищий за 7. Межа нейтральності зміщується з температурою, оскільки йонний добуток води не є сталою для всіх температур.

$$[\text{H}^+] = 10^{-\text{pH}} \text{ моль/л} \quad (5.13)$$

5.3. Гідроксильний показник рОН

Аналогічно визначають рОН через концентрацію гідроксид-іонів. За температури 25 °С у розведених водній системі сума рН і рОН дорівнює приблизно 14. Наприклад, якщо в навчальній задачі відома концентрація OH^- у водному розчині сильного лугу 10^{-2} моль/л, то $\text{pOH} = 2$, а $\text{pH} = 12$. При обчисленнях потрібно уважно розрізняти концентрацію лугу та концентрацію OH^- , якщо на одну формульну одиницю припадає більше ніж одна гідроксильна група.

$$\text{pOH} = -\lg[\text{OH}^-] \quad (5.14)$$

$$\text{pH} + \text{pOH} \approx 14 \quad (25 \text{ }^\circ\text{C}) \quad (5.15)$$

Джерела розділу: [1, с. 88–90]; [3, розд. 9]. [5, розд. про електроліти]

6. Індикатори та якісне визначення кислотності

6.1. Кислотно-основні індикатори

Індикатори — речовини, забарвлення яких змінюється залежно від кислотності середовища. Завдяки цьому вони дозволяють отримати якісну або орієнтовну оцінку рН.

Приклади поширених індикаторів — лакмус, метилоранж та фенолфталеїн. Для кожного індикатора існує власний інтервал переходу забарвлення, тому один і той самий розчин може мати різне забарвлення залежно від використаного індикатора.

Зміна забарвлення індикаторів у розчинах кислот і лугів			
Індикатори	Колір індикатора в середовищі		
	нейтральному	кислому	лужному
ЛАКМУС	Фіолетовий	Червоний	Синій
ФЕНОЛ-ФТАЛЕЇН	Безбарвний	Безбарвний	Малиновий
МЕТИЛОВИЙ ОРАНЖЕВИЙ	Оранжевий	Рожевий	Жовтий

Рис. 5.3. Забарвлення найпоширеніших індикаторів у кислому, нейтральному та лужному середовищах

Лакмус у кислому середовищі має червоне, а в лужному — синє забарвлення; поблизу нейтрального середовища — проміжне фіолетове. Фенолфталеїн у кислому й близькому до нейтрального середовищі безбарвний, а в досить лужному набуває малинового забарвлення. Метилоранж переходить від червонуватого забарвлення в кислому середовищі до жовтого в менш кислому й лужному. Для точного визначення рН застосовують відповідні вимірювальні засоби, а не тільки оцінку кольору.

6.2. Кислотність технологічних середовищ

Показник рН допомагає контролювати кислотно-основні характеристики промивних, мийних та інших робочих водних середовищ. У виробничих умовах його вплив залежить від конкретного матеріалу, домішок, температури та складу розчину. Тому сам по собі рН не визначає повністю агресивність рідини, швидкість корозії металу або придатність розчину до певної технологічної операції.

Для навчального прикладу можна розглянути контроль якості розчину після умовного процесу нейтралізації. Якщо відомі початкова концентрація та об'єм сильної кислоти, розраховують стехіометричну потребу в лузі за рівнянням реакції. Після цього оцінюють, яке середовище очікується за відсутності надлишку реагентів у спрощеній моделі. Фактичний рН у технологічній системі перевіряють вимірюванням, оскільки можуть бути присутні інші кислотно-основні компоненти.

Забарвлення індикаторів застосовують насамперед для демонстрації та попереднього розрізнення середовищ. Якщо потрібно визначити конкретне числове значення рН або контролювати відносно вузький діапазон, необхідні відповідна калібровка та інструментальне вимірювання.

Джерела розділу: [1, с. 52–53, 89–91]; [2, розд. про водневий показник].

7. Гідроліз солей і реакція середовища

7.1. Що називають гідролізом

Гідролізом солей у водних розчинах називають взаємодію їхніх йонів із водою, що приводить до встановлення нових кислотно-основних рівноваг. Якщо сіль утворена сильною кислотою та сильною основою, як NaCl, помітного гідролізу її йонів у звичайній навчальній моделі немає, і розчин має середовище, близьке до нейтрального. Якщо сіль містить йон, сполучений зі слабкою кислотою або слабкою основою, середовище може стати лужним або кислим.

Прикладом солі сильної основи та слабкої кислоти є Na₂CO₃. Карбонат-іон реагує з молекулою води, утворюючи гідрогенкарбонат-іон та OH⁻; унаслідок цього розчин має лужну реакцію. Сіль сильної кислоти та слабкої основи NH₄Cl здатна утворювати в розчині надлишок гідратованих йонів Гідрогену, тому середовище є кислим.



Таблиця 5.2. Приклади реакції середовища розчинів солей

Сіль	Походження	Очікуване середовище
NaCl	Сильна кислота + сильна основа	Близьке до нейтрального
NH ₄ Cl	Сильна кислота + слабка основа	Кисле
Na ₂ CO ₃	Слабка кислота + сильна основа	Лужне
CH ₃ COONa	Слабка кислота + сильна основа	Лужне

Для солей слабкої кислоти та слабкої основи рН залежить від співвідношення їхніх кислотно-основних характеристик. У межах цього конспекту достатньо вміти визначати якісний характер середовища для простих типових випадків. Розрахунок точного рН таких систем потребує констант рівноваги та додаткових наближень і не входить до базових завдань ФМБ.

Гідроліз пояснює, чому після розчинення різних солей у воді одержують неоднакову реакцію середовища, навіть коли самі солі не містять у формулі вільних H⁺ або OH⁻. Це важливо під час аналізу водних технічних середовищ і можливого впливу на стан металевих поверхонь.

Джерела розділу: [1, с. 90–91]; [2, розд. «Гідроліз солей»].

8. Узагальнений приклад кислотно-основного розрахунку

8.1. Від кількості реагенту до якісної оцінки рН

Розглянемо навчальну ситуацію: потрібно визначити, який об'єм розчину NaOH молярної концентрації 0,20 моль/л необхідний для повної нейтралізації 150 мл розчину HCl концентрації 0,10 моль/л. Реакція відбувається у співвідношенні 1:1. Кількість кислоти

становить 0,015 моль, отже, така сама кількість лугу потрібна для стехіометричної нейтралізації. Шуканий об'єм лугу становить 0,075 л, або 75 мл.

$$n(\text{HCl}) = 0,10 \cdot 0,150 = 0,015 \text{ моль} \quad (5.18)$$

$$V(\text{NaOH}) = 0,015 / 0,20 = 0,075 \text{ л} \quad (5.19)$$

Цей приклад об'єднує знання про молярну концентрацію, урівнювання реакцій і дисоціацію сильних електролітів. У спрощеній моделі за точної нейтралізації сильної кислоти сильним лугом за температури 25 °С середовище буде близьким до нейтрального. Якщо лугу взято менше необхідної кількості, залишиться надлишок кислоти; якщо більше — надлишок лугу. Для обчислення рН такого залишку потрібно знати вже не початкові, а кінцеві концентрації після змішування.

Послідовність під час аналізу реального водного середовища ширша за простий стехіометричний розрахунок: потрібно враховувати інші розчинені речовини, можливий гідроліз, температуру та відповідність використаної навчальної моделі фактичним умовам. Тому для практичних робіт із хімії достатньо задач на прості однокомпонентні системи, а оцінювання конкретного промислового процесу не слід виконувати без додаткових вихідних даних.

Підсумок теми: електролітична дисоціація пояснює йонний склад водних розчинів; сила електроліту характеризує ступінь утворення йонів; рН кількісно описує кислотність у визначених умовах; гідроліз дає змогу передбачати реакцію середовища розчинів солей. Ці положення будуть використані під час практичних розрахунків концентрацій та нейтралізації.

Питання для самоперевірки

1. Чому розчин NaCl проводить струм, а розчин сахарози — практично ні?
2. Чим сильний електроліт відрізняється від слабого?
3. Що означає ступінь дисоціації?
4. Яке скорочене йонне рівняння відповідає нейтралізації сильної кислоти сильним лугом?
5. Який рН має розведений розчин сильної кислоти з $[\text{H}^+] = 10^{-4}$ моль/л?
6. Чому розчин Na_2CO_3 зазвичай має лужну реакцію?

Використані джерела

[1] Назарко І. С., Вічко О. І. Загальна хімія. Тернопіль: ТНТУ, 2019. Тема 6, підрозділи 6.4–6.7.

[2] Хоботова Е. Б. Загальна та неорганічна хімія. Ч. 1. Загальна хімія. Харків: ХНАДУ, 2023. Розділи «Електролітична дисоціація», «Гідроліз солей».

[3] Власенко Н. Є., Коваленко І. В., Потаскалов В. А. Хімія. Ч. 1. Загальна хімія. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. Розділи 8–9.

[4] Петрушина Г. О., Пугач Л. І., Завріна С. В. Загальна та неорганічна хімія: навчальний посібник. Дніпропетровськ: Пороги, 2016. Розділ 1 «Загальна хімія»: дисоціація та рН.

[5] Степаненко О. М., Рейтер Л. Г., Ледовських В. М., Іванов С. В. Загальна та неорганічна хімія: у 2 частинах. Частина 1. Київ: Педагогічна преса, 2002. Розділи про електроліти та водні розчини.

ТЕМА 6

ЕНЕРГЕТИКА, ШВИДКІСТЬ ТА РІВНОВАГА ХІМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

1. Енергетика і перебіг хімічних процесів

Мета лекції. Пояснити, чому хімічні реакції супроводжуються поглинанням або виділенням енергії; розкрити зміст швидкості реакції, хімічної рівноваги та впливу умов на перебіг процесу.

План лекції

1. Енергія хімічних реакцій. 2. Тепловий ефект і закон Гесса. 3. Напрямок хімічних процесів. 4. Швидкість реакцій та чинники її зміни. 5. Каталіз. 6. Хімічна рівновага та принцип Ле Шательє. 7. Прості приклади для матеріалознавства.

1.1. Хімічна реакція як перетворення речовин та енергії

Під час хімічної реакції руйнуються одні хімічні зв'язки та утворюються інші. Енергетичні зміни залежать від співвідношення витрат енергії на розрив зв'язків і енергії, що виділяється під час їх утворення. Зовнішніми проявами можуть бути нагрівання, охолодження, світіння або утворення газу, але самі ці ознаки ще не дають кількісної характеристики реакції.

Термодинамічна система — частина середовища, яку умовно відокремлюють для дослідження. У відкритій системі можливий обмін і речовиною, і енергією; замкнута система обмінюється з оточенням енергією, але не речовиною; ізольована в ідеальній моделі не обмінюється ні тим, ні іншим. У реальних виробничих умовах абсолютно ізольовану систему майже неможливо створити.



Рис. 6.1. Схематичне порівняння відкритої, замкнутої та ізольованої систем

Для нагрітої металевої деталі важливий теплообмін із повітрям; для реакції у відкритому тиглі — також надходження кисню й вихід газоподібних продуктів. Під час розв'язування задач треба завжди з'ясувати, яка система розглядається та які види обміну враховуються.

У технічній хімії параметрами стану найчастіше служать температура, тиск, об'єм і концентрація. На відміну від кількості речовини чи загальної енергії, температура та тиск не залежать від розміру однорідної системи; їх називають інтенсивними величинами. Маса й сумарний запас енергії змінюються разом із розміром системи та належать до екстенсивних

характеристик. Ця різниця допомагає не плутати теплоту, виділену всією партією речовини, з питомими характеристиками окремої кількості реагенту.

Джерела розділу: [1, с. 62–64]; [2, розд. 4].

2. Тепловий ефект реакції і термохімічні рівняння

2.1. Екзотермічні та ендотермічні реакції

Екзотермічна реакція супроводжується передаванням теплоти в навколишнє середовище. Ендотермічна реакція за заданих умов потребує надходження теплоти. За сталого тиску та за відсутності інших видів роботи, крім роботи розширення тепловий ефект реакції пов'язують зі зміною ентальпії ΔH : для екзотермічної реакції $\Delta H < 0$, а для ендотермічної $\Delta H > 0$. Знак визначають з погляду системи, а не спостерігача.

$$\Delta H = H(\text{продуктів}) - H(\text{реагентів}) \quad (6.1)$$

Термохімічне рівняння записують разом з агрегатними станами речовин. Якщо згоряє певна кількість палива, тепловий ефект для іншої кількості знаходять пропорційно до кількості речовини, зазначеної у рівнянні. Не можна без уточнень переносити тепловий ефект реакції з утворенням водяної пари на таке саме рівняння з утворенням рідкої води.

2.2. Закон Гесса

За законом Гесса тепловий ефект перетворення залежить від початкового та кінцевого станів системи, а не від способу, яким система перейшла з одного стану в інший. Цей принцип дає змогу підсумовувати відомі термохімічні рівняння для визначення теплового ефекту реакції, яку складно дослідити безпосередньо.

$$\Delta H(\text{загальна}) = \Delta H_1 + \Delta H_2 + \dots + \Delta H_n \quad (6.2)$$

Наприклад, якщо одна речовина послідовно перетворюється спочатку на проміжний продукт, а потім — на кінцевий, сумарна зміна ентальпії дорівнює сумі змін ентальпії обох стадій. У навчальних розрахунках важливо коректно множити тепловий ефект разом із коефіцієнтами рівняння, а під час обернення реакції — змінювати знак ΔH на протилежний.

Таблиця 6.1. Знаки теплових ефектів

Тип реакції	Зміна ентальпії	Енергетичний прояв
Екзотермічна	$\Delta H < 0$	Теплота віддається оточенню
Ендотермічна	$\Delta H > 0$	Теплота надходить до системи

Для коректного використання термохімічних даних обов'язково зіставляють коефіцієнти рівняння, агрегатні стани й одиниці вимірювання. Якщо тепловий ефект записано для утворення двох молів продукту, для одного моля за тих самих умов він буде удвічі меншим. Рівняння утворення оксиду під час нагрівання металу не дозволяє саме по собі визначити фактичну температуру виробу: одночасно відбувається теплопередавання до металу, повітря та

оснащення. У виробничій практиці тому розрізняють хімічний тепловий ефект і загальний тепловий баланс установки.

Джерела розділу: [1, с. 64–68]; [2, розд. 4]. [4, розд. про хімічну термодинаміку]

3. Енергетична можливість і фактична швидкість реакцій

3.1. Самочинність процесу

Навіть реакція з виділенням теплоти не завжди розпочинається негайно. Для оцінювання можливості самочинного перебігу за сталих температури й тиску застосовують зміну енергії Гіббса ΔG . Якщо $\Delta G < 0$, прямий напрям є термодинамічно можливим за заданих умов; за $\Delta G = 0$ встановлюється рівновага. Величина ΔG характеризує можливість і напрям процесу, але сама по собі не показує, скільки хвилин або років він триватиме.

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S \quad (6.3)$$

Тут T — абсолютна температура, а ΔS — зміна ентропії. На рівні фахового молодшого бакалавра важливо розуміти значення складових формули, а не розв'язувати складні задачі з термодинамічних потенціалів. Температура може змінювати вигідність прямого й зворотного процесів, тому висновок завжди стосується конкретних умов.

3.2. Чому реакції відбуваються з різною швидкістю

Атоми або молекули повинні зіткнутися з достатньою енергією та відповідним взаємним розташуванням, щоб реакція відбулася. Енергію, необхідну для подолання початкового енергетичного бар'єра, називають енергією активації. Саме тому багато реакцій, які термодинамічно можливі, помітно прискорюються лише після нагрівання або введення каталізатора.

Для залізного виробу окиснення на вологому повітрі термодинамічно можливе, але його реальна швидкість залежить від вологості, стану поверхні й складу середовища. При нагріванні металу до високої температури можуть інтенсивно утворюватися оксиди. Отже, термодинамічна можливість, кінетична швидкість і фактичні виробничі умови — різні аспекти одного процесу.

При зіставленні двох технологічних процесів не варто робити висновок лише за знаком теплового ефекту: реакція з більшою кількістю виділеної теплоти не обов'язково перебігає швидше. Швидкість вивчає окремий розділ хімії — хімічна кінетика.

Інший аспект енергетики пов'язаний з ентропією: під час самочинного перебігу процесів у природі енергія не завжди повністю придатна для перетворення на корисну роботу. За високої температури роль члена $T \cdot \Delta S$ у рівнянні Гіббса може зростати. Це якісно пояснює, чому деякі високотемпературні процеси мають інший рівноважний стан, ніж аналогічні процеси за кімнатної температури. Однак розрахунок фактичного напрямку в багатокомпонентній системі потребує довідкових термодинамічних даних, які не вводитимемо без джерел.

Джерела розділу: [2, розд. 4–5]; [3, розд. «Енергетика та кінетика»].

4. Швидкість хімічних реакцій

4.1. Середня швидкість

Швидкість гомогенної реакції характеризують зміною концентрації учасника процесу за одиницю часу. Концентрація реагенту зменшується, а продукту — зростає. Якщо за перебігом спостерігають за одним реагентом, перед відношенням зміни концентрації до часу ставлять знак мінус, щоб швидкість була додатною. Для різних речовин у тому самому рівнянні треба враховувати стехіометричні коефіцієнти.

$$v(\text{реагенту}) = -\Delta C / \Delta t \quad (6.4)$$

$$v(\text{продукту}) = +\Delta C / \Delta t \quad (6.5)$$

Одиницею середньої швидкості в навчальних задачах може бути моль/(л·с). На практиці швидкість твердих металів у реакції з газом чи розчином часто характеризують зміною маси або товщини шару за одиницю часу. Порівнювати швидкості, наведені в різних одиницях, без відповідного перерахунку не можна.

4.2. Концентрація, поверхня, температура

Збільшення концентрації реагентів часто підвищує число ефективних зіткнень між частинками. Зміна тиску відчутно впливає переважно на процеси за участю газів. Для реакції твердого металу з рідиною або газом важливі площа контакту, наявність оксидної плівки та перемішування. Металевий порошок має більшу питому поверхню, ніж масивний зразок тієї самої маси, тому може реагувати значно швидше.

Підвищення температури зазвичай збільшує частку частинок, які мають достатню енергію для подолання бар'єра активації. У спрощених навчальних задачах застосовують температурний коефіцієнт швидкості γ , що показує, у скільки разів швидкість змінюється при підвищенні температури на 10 °C у заданому інтервалі.

$$v_2 / v_1 = \gamma^{((t_2 - t_1) / 10)} \quad (6.6)$$

Температурний коефіцієнт не є універсальною сталою: його значення й застосовність залежать від конкретної реакції та температурного інтервалу.

Для реакцій між твердим металом і газом швидкість залежить також від утвореного шару продукту. Поки поверхня чиста, газ безпосередньо контактує з металом; після появи суцільного оксиду молекули газу або йони можуть проникати через шар значно повільніше. Отже, збільшення температури й площі поверхні не в усіх випадках приводить до однакового зростання швидкості. Для вивчення корозії та окалиноутворення важливо враховувати не лише зіткнення частинок, а й доступ реагенту до поверхні.

Джерела розділу: [1, с. 69–73]; [2, розд. 5]. [5, розд. про кінетику]

5. Енергія активації та каталіз

5.1. Енергетичний профіль реакції

Порівняння початкового стану, проміжного активованого стану та продуктів показує, чому для початку процесу потрібно подолати енергетичний бар'єр. Висота цього бар'єра відповідає енергії активації. На енергетичному профілі її відраховують від енергетичного рівня реагентів до вершини. Тепловий ефект реакції, навпаки, визначається різницею між рівнями реагентів і продуктів.



Рис. 6.2. Схема енергетичного профілю реакції та енергії активації

5.2. Каталізатор і його дія

Каталізатор змінює механізм перебігу реакції, забезпечуючи альтернативний шлях із меншою енергією активації. За однакових умов це може значно прискорювати процес. Каталізатор після завершення сумарної реакції відновлюється і не входить до стехіометричного рівняння як звичайний витратний реагент. У реальних системах можливе поступове отруєння або деактивація каталізатора.

Каталізатор не змінює термодинамічної рівноваги та загальної зміни енергії Гіббса реакції; він прискорює наближення до рівноваги. Це важливо: якщо задані температура й склад газової суміші, введення каталізатора не може довільно змістити рівноважний склад, хоча дозволяє швидше досягти його.

Таблиця 6.2. Порівняння двох способів прискорення

Зміна умови	Що насамперед змінюється	Важливе застереження
Нагрівання	Швидкість багатьох реакцій	Може змінити також рівноважний склад
Введення каталізатора	Шлях та швидкість реакції	Не змінює рівноважного положення

Для розрахункових вправ достатньо вміти порівнювати два профілі з різною висотою активаційного бар'єра та пояснювати, чому швидкість змінюється, не змінюючи рівняння сумарного хімічного перетворення.

Каталіз буває гомогенним, коли каталізатор і реагенти перебувають в одній фазі, та гетерогенним, коли реакція відбувається на поверхні іншої фази. Для гетерогенного каталізу

особливо важлива чистота поверхні: забруднення здатне блокувати активні центри. Ця відмінність пояснює, чому реальна швидкість каталізованого процесу залежить не лише від хімічної формули каталізатора, а й від його стану та площі поверхні. У межах цієї теми застосування каталізу розглядаємо як якісний приклад впливу механізму реакції на її швидкість.

Джерела розділу: [1, с. 72–74]; [2, розд. 5].

6. Хімічна рівновага

6.1. Оборотні реакції

Оборотна реакція за заданих умов може перебігати в прямому та зворотному напрямках. На початку змішування реагентів переважає прямий процес, але в міру накопичення продуктів швидкість зворотної реакції зростає. Коли ці швидкості стають рівними, встановлюється динамічна хімічна рівновага: обидві реакції тривають, проте макроскопічний склад системи більше не змінюється.



$$v(\text{прямої}) = v(\text{зворотної}) \quad (6.8)$$



Рис. 6.3. Зміна швидкостей прямої та зворотної реакцій до досягнення рівноваги

6.2. Константа рівноваги

За сталої температури співвідношення рівноважних концентрацій для простої оборотної реакції можна описати константою рівноваги. Для наведеної реакції утворення гідроген йодиду добуток концентрацій продукту в степені, що відповідає коефіцієнту, ділять на добуток концентрацій вихідних газів. Значення K залежить від температури і не змінюється лише через початкову кількість реагентів.

$$K_c = [\text{HI}]^2 / ([\text{H}_2] \cdot [\text{I}_2]) \quad (6.9)$$

У формулу підставляють саме рівноважні, а не початкові концентрації. Якщо до рівноважної суміші додати один із компонентів, виникає тимчасовий дисбаланс; після перебігу прямого або зворотного процесу встановлюється новий рівноважний склад за тієї самої температури.

Для гетерогенних процесів, у яких одночасно присутні тверді, рідкі та газоподібні фази, вирази констант рівноваги складніші. У курсі ФМБ достатньо розуміти зміст рівноваги та найпростіші концентраційні вирази для газових систем.

Коли кажуть, що реакція досягла рівноваги, це не означає, що всі реагенти повністю витрачені. У суміші можуть одночасно залишатися і вихідні речовини, і продукти, а їхнє співвідношення визначається константою рівноваги при заданій температурі. Якщо рівноважний склад змінено шляхом вилучення одного продукту, реакція може відновити його утворення. Саме тому поняття рівноваги є корисним для якісного обговорення газових реакцій у техніці, але без довідкових даних із нього не одержують точну масу кінцевого продукту.

Джерела розділу: [1, с. 74–76]; [2, розд. 6].

7. Зміщення рівноваги та принцип Ле Шательє

7.1. Вплив концентрації, тиску і температури

Якщо на систему в стані рівноваги діє зовнішня зміна умов, система зазвичай реагує в напрямі, який частково послаблює наслідки цієї зміни. Так формулюють принцип Ле Шательє. Збільшення концентрації реагенту часто зміщує рівновагу в бік його витрачання; вилучення продукту також може сприяти прямій реакції.

Підвищення тиску зміщує рівновагу газової системи в бік меншої кількості молів газу, якщо ця кількість неоднакова по обидва боки рівняння. Якщо число молів газу в прямому й зворотному напрямках однакове, ефект тиску може бути незначним у межах ідеальної моделі. Підвищення температури сприяє ендотермічному напрямку, а охолодження — екзотермічному.

Таблиця 6.3. Типові зміни рівноваги

Вплив	Очікуваний напрям зміщення
Додавання реагенту	У бік його споживання
Вилучення продукту	У бік утворення продукту
Підвищення температури	У бік ендотермічної реакції
Підвищення тиску в газовій системі	У бік меншої кількості молів газу

Принцип допомагає якісно передбачити зміни, але без констант рівноваги та вихідного складу він не дає точної кількості продукту. Каталізатор у цій таблиці не зазначений: він не зміщує хімічної рівноваги, а прискорює її встановлення.

Принцип Ле Шательє застосовують тільки після перевірки рівняння та характеру реакції. Наприклад, підвищення тиску не може однаково впливати на всі газові перетворення: якщо ліворуч і праворуч однакове число молів газів, просте правило про зміщення за тиском не дає ефекту. Для зміни температури потрібно знати, який напрям є ендотермічним. Якщо теплота виділяється в прямому напрямі, нагрівання сприяє зворотній реакції, але одночасно може прискорювати встановлення нового рівноважного стану.

Джерела розділу: [1, с. 74–76]; [2, розд. 6].

8. Узагальнення для технічних процесів

8.1. Як застосувати матеріал при вивченні металів

Нагрівання сталевोї заготовки, окиснення її поверхні та подальше охолодження ілюструють зв'язок трьох питань: енергетики реакцій, швидкості процесів та можливості утворення нових речовин. Тепловий ефект окиснення характеризує енергетичний бік; температура й площа поверхні впливають на швидкість; склад газового середовища визначає, які взаємодії можуть бути можливими.

У спрощеній навчальній вправі для реакції із заданим тепловим ефектом -120 кДж на 1 моль реагенту під час перетворення $0,25$ моль цього реагенту виділиться 30 кДж теплоти. Це умовні числові дані, запропоновані лише для тренування пропорційного розрахунку; вони не є довідковою характеристикою конкретного металу.

$$Q(\text{виділена}) = 0,25 \cdot 120 = 30 \text{ кДж} \quad (6.10)$$

Під час аналізу виробничого процесу така оцінка є лише першою стадією: реальна корисна теплота залежить від втрат, теплоємності конструкції та режиму нагрівання. У практичній роботі достатньо показати, як із термохімічного рівняння й кількості реагенту одержують теплову оцінку.

Питання для самоперевірки

1. Що відрізняє відкриту систему від закритої?
2. Як за знаком ΔH розпізнати екзотермічну реакцію?
3. Чому термодинамічна можливість не означає великої швидкості?
4. Як каталізатор впливає на енергію активації?
5. Що означає динамічна рівновага?
6. Як температура впливає на рівновагу екзотермічної реакції?

Корисно розділяти три питання в кожній розрахунковій задачі: чи можливе перетворення, з якою швидкістю воно може відбуватися та який остаточний склад є рівноважним. Для відповіді на перше потрібна термодинамічна інформація, на друге — кінетичні характеристики й умови контакту, на третє — рівноважні залежності. Сам по собі знак теплового ефекту не дає відповідей на всі три питання. Такий спосіб аналізу стане потрібним у темах про окиснення сплавів і хімічні процеси зварювальної ванни.

Використані джерела

- [1] Назарко І. С., Вічко О. І. Загальна хімія. Тернопіль: ТНТУ, 2019. Тема 5, с. 60–76.
- [2] Власенко Н. Є., Коваленко І. В., Потаскалов В. А. Хімія. Ч. 1. Загальна хімія. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. Розд. 4–6.
- [3] Хоботова Е. Б. Загальна та неорганічна хімія. Ч. 1. Харків: ХНАДУ, 2023. Розд. про закономірності хімічних процесів.

[4] Степаненко О. М., Рейтер Л. Г., Ледовських В. М., Іванов С. В. Загальна та неорганічна хімія: у 2 частинах. Частина 1. Київ: Педагогічна преса, 2002. Розділи «Елементи хімічної термодинаміки», «Основи хімічної кінетики», «Хімічна рівновага».

[5] Петрушина Г. О., Пугач Л. І., Завріна С. В. Загальна та неорганічна хімія: навчальний посібник. Дніпропетровськ: Пороги, 2016. Розділ 1 «Загальна хімія»: закономірності реакцій.

ТЕМА 7

ОКИСНО-ВІДНОВНІ ПРОЦЕСИ ТА ХІМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ МЕТАЛІВ

1. Окисно-відновні процеси як основа хімії металів

Мета лекції. Повторити правила визначення ступенів окиснення та складання електронного балансу; розглянути типові окисно-відновні реакції металів у водних розчинах і газових середовищах.

План лекції

1. Окиснення, відновлення, ступені окиснення. 2. Електронний баланс. 3. Реакції металів із киснем, водою, кислотами й солями. 4. Ряд активності металів. 5. Сполуки Феруму та амфотерні метали. 6. Пасивація й значення окиснення для техніки.

1.1. Електронна природа окиснення й відновлення

Окисно-відновними називають реакції, у яких змінюються ступені окиснення хоча б частини елементів. Процес віддавання електронів є окисненням, а приймання — відновленням. Відновник віддає електрони й сам окиснюється; окисник приймає електрони й сам відновлюється. У загальній реакції ці процеси відбуваються одночасно, адже електрони не можуть зникати або виникати без відповідної протилежної напівреакції.



Типовим прикладом є занурення цинкової пластини в розчин купрум(II) сульфату. Пластина поступово віддає йони Zn^{2+} у розчин, тоді як йони Cu^{2+} відновлюються і можуть осаджуватися на поверхні цинку. Це не просто обмін речовин: одночасно відбувається перенесення електронів від активнішого металу до йонів менш активного.



Під час вивчення електрохімії ми побачимо, що розділення напівреакцій у просторі дає можливість використовувати електронний потік у зовнішньому колі. У цій лекції насамперед важливо правильно розрізняти окисник і відновник та встановлювати зв'язок електронного балансу з коефіцієнтами рівняння.

Щоб визначити окисник і відновник у складній реакції, спочатку виписують формули реагентів та продуктів, після чого порівнюють ступені окиснення однакових елементів. Підвищення ступеня означає втрату електронів, а зниження — їх приєднання. Для йонних рівнянь важливо відрізнити заряд усього йона від формального ступеня окиснення окремого елемента в ньому. Такий порядок роботи допомагає уникнути поширеної помилки, коли електронний баланс складають за елементами, ступені окиснення яких узагалі не змінилися.

Джерела розділу: [1, с. 96–98]; [2, розд. 10].

2. Ступені окиснення та електронний баланс

2.1. Визначення ступенів окиснення

Ступінь окиснення — формальний заряд атома в сполуці за умовного повного переходу спільних електронних пар до електронегативнішого атома. У простих речовинах ступінь окиснення дорівнює нулю. Флуор у сполуках переважно має -1 ; Гідроген із неметалами — $+1$; Оксиген здебільшого — -2 . Сума ступенів окиснення атомів електронейтральної сполуки дорівнює нулю, а для багатоатомного йона — його заряду.

Таблиця 7.1. Приклади ступенів окиснення

Речовина	Елемент	Ступінь окиснення
Fe	Fe	0
FeO	Fe	+2
Fe ₂ O ₃	Fe	+3
H ₂ SO ₄	S	+6
KMnO ₄	Mn	+7

2.2. Урівнювання простої реакції

Електронний баланс складають для атомів, ступені окиснення яких змінюються. Кількість відданих електронів має дорівнювати кількості прийнятих. Для взаємодії магнію з киснем Магній переходить зі ступеня 0 до $+2$, а Оксиген — із 0 до -2 . Оскільки молекула O₂ містить два атоми Оксигену, їй повне відновлення потребує чотирьох електронів; їх віддають два атоми Магнію.



Коефіцієнти добирають не тільки за електронами, а й за законом збереження числа атомів кожного елемента. Особливо уважно перевіряють рівняння за участю оксигеновмісних кислот, води й складних йонів. Для першого етапу навчання достатньо балансувати прості реакції сполучення, заміщення та відновлення оксидів.

Окреме вміння — відрізнити реальну зміну ступеня окиснення від звичайного йонного обміну. Наприклад, під час взаємодії HCl і NaOH ступені окиснення елементів не змінюються, тому нейтралізація не є окисно-відновною реакцією.

У реакціях металів особливу увагу звертають на індекси в простих речовинах: молекула кисню складається з двох атомів Оксигену, тому приймання електронів потрібно обчислювати для всієї молекули. Визначивши множники електронного балансу, добирають коефіцієнти до інших речовин і лише потім остаточно перевіряють кількість усіх атомів. Якщо реакція

відбувається в кислому або лужному розчині, до розрахунку можуть входити йони H^+ , OH^- та молекули H_2O , однак на початковому етапі достатньо спершу опанувати прості молекулярні рівняння.

Джерела розділу: [1, с. 96–98]; [3, розд. «Окисно-відновні процеси»]. [4, розд. про окисно-відновні реакції]

3. Окиснення металів у газових середовищах

3.1. Взаємодія з киснем

Під час нагрівання багато металів активно реагують з киснем, утворюючи оксиди. Вид оксиду залежить від природи металу, температури та доступу кисню. Для активних металів реакція може перебігати інтенсивно; для деяких конструкційних металів на поверхні формується щільна оксидна плівка, яка сповільнює подальшу взаємодію. Утворення оксиду є окисно-відновним процесом, оскільки метал підвищує ступінь окиснення, а Оксиген знижує його.



У сталях найважливішим металевим компонентом є залізо. За різних умов воно утворює оксиди FeO , Fe_3O_4 та Fe_2O_3 . Їхнє співвідношення на поверхні нагрітого виробу залежить від температури та складу газової атмосфери. Не слід припускати, що оксидна плівка на всіх металах однаково добре захищає поверхню: її захисна дія залежить від суцільності, здатності до розтріскування та зчеплення з металом.



У газових процесах склад атмосфери суттєвий: за нестачі кисню можуть зростати частки нижчих оксидів, а за наявності водяної пари або інших реакційно здатних компонентів можливі додаткові перетворення. Для базової хімії важливо розуміти зв'язок складу оксидного продукту зі ступенями окиснення металу.

3.2. Відновлення оксидів металів

Метали можна одержувати шляхом відновлення їхніх сполук. У спрощеному рівнянні відновлення оксиду заліза карбон(II) оксидом Ферум змінює ступінь окиснення з +3 до 0, а Карбон у складі CO — з +2 до +4. Таку реакцію розглядають як базовий хімічний принцип металургійних процесів, а не як повний опис промислового агрегату.



У високотемпературних процесах важливий не лише факт окиснення, а й поведінка оксидної плівки. Якщо вона суцільна, міцно тримається на поверхні й уповільнює надходження кисню, подальша реакція може сповільнюватися. Якщо шар пористий або відшаровується, свіжа поверхня знову контактує з окисником. Тому спостереження утворення оксидів не

дозволяє автоматично робити висновок про захист металу. Для якісної оцінки враховують також температурні деформації та хімічну природу продуктів окиснення.

Джерела розділу: [1, с. 108–110, 114–115]; [3, розд. про сполуки Феруму].

4. Хімічна активність і ряд напруг металів

4.1. Метали у воді та розчинах кислот

Метали відрізняються здатністю віддавати електрони. Ряд електрохімічної активності розташовує метали за стандартними електродними потенціалами, проте фактична реакційна здатність у конкретному розчині залежить також від складу середовища та стану поверхні. Частина активних металів реагує з водою за звичайних умов; магній інтенсивніше взаємодіє з гарячою водою або паром; залізо зазвичай не виділяє водень із холодної чистої води помітною швидкістю.

У спрощеній моделі метали, розташовані у ряді активності до водню, можуть витіснити його з розведених кислот-неокисників, якщо не заважають пасивація або інші чинники. Мідь, розташована після водню, не витісняє його з розведеної HCl. Для нітратної та концентрованої сульфатної кислот це правило не можна застосовувати механічно, оскільки можливі інші окисно-відновні процеси.



Для металічної поверхні дуже важлива наявність тонкої оксидної плівки. Наприклад, алюміній термодинамічно є активним металом, але в багатьох звичайних умовах має помітну стійкість завдяки захисному шару Al_2O_3 . Тому фактична швидкість взаємодії залежить не лише від положення у ряді активності.

4.2. Витіснення менш активного металу із солі

Якщо активніший метал занурити в розчин солі менш активного, часто відбувається реакція заміщення. Відновлювані йони менш активного металу переходять у металевий стан, а активніший метал окиснюється. Для розчинів солей дуже активних металів у воді потрібно враховувати також можливу реакцію з водою.



Ряд напруг насамперед дозволяє зіставляти стандартні потенціали металів у водних електролітах. Для реальної металевої деталі цього недостатньо: оксидна плівка може блокувати реакцію, а нерівномірне надходження кисню — створювати на поверхні додаткові електрохімічні ділянки. Реакції заміщення бажано аналізувати в кілька кроків: визначити активніший метал, записати віддавання електронів, записати відновлення йонів і перевірити матеріальний баланс. Цей підхід поєднує тему окисно-відновних реакцій із майбутньою темою корозії.



Рис. 7.1. Навчальний ряд електрохімічної активності металів

Джерела розділу: [1, с. 98–100, 114–116]; [2, розд. 10]. [5, розд. про ОВР]

5. Кількісні співвідношення в реакціях металів

5.1. Від рівняння реакції до кількості продукту

Розрахунки окисно-відновних процесів підпорядковуються тим самим стехіометричним законам, які вивчалися у першій лекції. Після урівнювання рівняння визначають кількість речовини за масою, потім — потрібне співвідношення молів реагенту та продукту і, нарешті, шукану масу. Електронний баланс забезпечує правильні коефіцієнти, а не замінює матеріальний розрахунок.

Приклад: у навчальній умові до надлишку розчину CuSO_4 внесли 6,5 г цинку. Для обчислення теоретичної маси міді приймемо округлені навчальні молярні маси $M(\text{Zn}) = 65$ г/моль і $M(\text{Cu}) = 64$ г/моль. За рівнянням реакції один моль цинку відповідає одному молу міді. Отже, кількість цинку становить 0,10 моль, а розрахункова маса міді — 6,4 г за умови повного перебігу реакції.

$$n(\text{Zn}) = 6,5 / 65 = 0,10 \text{ моль} \quad (7.13)$$

$$m(\text{Cu}) = 0,10 \cdot 64 = 6,4 \text{ г} \quad (7.14)$$

Фактичний вихід може бути нижчим через неповний перебіг реакції або втрати під час відокремлення продукту. Якщо в задачі задані масові частки реагентів у технічних матеріалах, спочатку визначають масу чистого реагенту; потім переходять до кількості речовини.

Таблиця 7.2. Послідовність розрахунку

Етап	Що обчислюємо
1	Масу чистого реагенту
2	Кількість речовини реагенту
3	Кількість продукту за коефіцієнтами
4	Теоретичну масу продукту
5	Практичний вихід, якщо заданий

5.2. Перевірка розрахунку

Перед остаточною відповіддю корисно переконатися, що обчислена кількість електронів, переданих відновником, дорівнює кількості електронів, прийнятих окисником.

Після цього перевіряють одиниці вимірювання та коректність округлення. Значення атомних мас бажано брати з однієї обраної таблиці протягом усього розв'язку.

Якщо розчин містить обмежену кількість купрум(II) сульфату, задача змінюється: маса цинку вже не є єдиним обмежувальним фактором. Треба окремо розрахувати кількість Zn і CuSO_4 , зіставити їх за коефіцієнтами рівняння та визначити реагент, який буде витрачений першим. Лише після цього визначають теоретичну масу міді. Такий спосіб потрібний і в виробничих матеріальних балансах, коли вхідна кількість двох компонентів обмежена й надлишок одного не гарантується умовою.

Джерела розділу: [1, с. 96–98]; [3, розд. про кількісні закони].

6. Залізо і сполуки Феруму

6.1. Найважливіші ступені окиснення Феруму

У хімічних процесах, пов'язаних зі сталлю, найчастіше розглядають переходи між Fe^0 , Fe^{2+} і Fe^{3+} . Йони Fe^{2+} здатні окиснюватися до Fe^{3+} , зокрема під дією кисню за відповідних умов. Оксиди FeO , Fe_2O_3 і Fe_3O_4 розрізняються складом та співвідношенням ступенів окиснення Феруму. Fe_3O_4 часто розглядають як змішаний оксид із Fe(II) та Fe(III) .



У кислому водному розчині залізо може розчинятися із переходом у Fe^{2+} та виділенням водню, якщо для цього є відповідні умови. За участю кисню, води та інших компонентів можливе утворення гідроксидів і продуктів подальшого окиснення. У практиці це є підґрунтям для розуміння корозії; докладніше її механізм розглянемо у наступній лекції.



6.2. Хімічні властивості як причина технологічної різноманітності

Залізо використовують здебільшого у сплавах, а не як хімічно чистий метал. Інші компоненти, зокрема Карбон, Силіцій, Манган, Хром і Нікель, змінюють структуру, механічні та корозійні властивості сплавів. Під час нагрівання деякі компоненти сплаву можуть окиснюватися легше за інші, тому склад поверхневого оксидного шару не завжди повторює склад об'єму металу.

Для здобувача спеціальності G9 важливо розрізняти хімічний склад початкового сплаву та склад продуктів його взаємодії з газовою фазою. Наприклад, у зоні нагрівання можливі як корисне утворення захисної плівки, так і небажане утворення товстої окалини. Не всі ці процеси можна описати одним рівнянням $\text{Fe} + \text{O}_2$: реальна поверхня складна та неоднорідна.

Fe^{2+} та Fe^{3+} утворюють різні солі й гідроксиди, які можна розрізняти за характерними реакціями. У простих водних системах Fe(OH)_2 може окиснюватися киснем повітря з утворенням сполук Fe(III) . Послідовне перетворення продуктів залежить від кислотності, температури та доступу кисню. Через це іржу на сталі не слід описувати як одну чисту хімічну

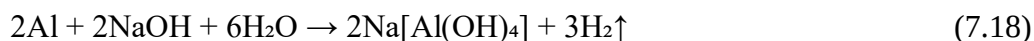
сполуку з незмінним складом. У навчальній схемі достатньо відстежити окиснення металевого заліза до Fe^{2+} і подальше окиснення до Fe^{3+} .

Джерела розділу: [1, с. 114–120]; [3, розд. про Ферум].

7. Амфотерність і пасивація металів

7.1. Амфотерні метали

Алюміній і цинк можуть виявляти амфотерні властивості: за відповідних умов вони реагують як із кислотами, так і з досить сильними лужними розчинами. Під час розчинення в концентрованому лужному середовищі утворюються комплексні гідроксосполуки, а метал окиснюється з виділенням водню. Конкретний склад продукту залежить від концентрації та середовища; наведене нижче рівняння є поширеною навчальною схемою.



7.2. Що таке пасивація

Пасивацією називають різке зменшення швидкості корозійного розчинення металу внаслідок формування на його поверхні захисного стану, найчастіше тонкої оксидної плівки. Для алюмінію та хрому поверхневі оксиди мають важливе захисне значення. Пошкодження плівки, зміна середовища або підвищення температури можуть порушувати пасивний стан; тому слово «пасивний» не означає повністю інертний за будь-яких умов.

Захисна плівка відрізняється від пухкої пористої окалини, крізь яку до металу продовжують надходити кисень і волога. Саме щільність, неперервність і здатність відновлюватися в конкретному середовищі визначають її дію. Тому не варто оцінювати корозійну стійкість сплаву лише за здатністю його компонента утворювати оксид.

У курсі хімії знання про пасивацію з'єднає теми електронної будови елементів, окиснення та майбутнє вивчення корозії. Воно також пояснює, чому хімічне очищення поверхонь і подальша обробка виробів повинні враховувати природу основного металу.

Оксидна плівка може утворитися природно або після спеціального оброблення металу, проте її захисні властивості необхідно пов'язувати з конкретним розчином. Хлорид-іони, наприклад, за несприятливих умов можуть порушувати локальну стійкість пасивних поверхонь. Нагрівання також здатне змінювати структуру й склад поверхневих оксидів. Тому в технічному аналізі розділяють дві задачі: пояснити термодинамічну схильність металу до окиснення та встановити, чи зберігається реальна пасивність за експлуатаційних умов.

Джерела розділу: [1, с. 114–125]; [3, розд. про Алюміній і Хром].

8. Окисно-відновні процеси у виробничих ситуаціях

8.1. Приклади для зварювального виробництва

У зоні високотемпературного зварювання одночасно можуть перебувати розплавлений метал, гази й оксидні сполуки. Хімічна поведінка основного та присадного металів визначає, які компоненти окиснюватимуться за контакту з киснем. За наявності кремнію або марганцю можливі реакції зв'язування кисню з утворенням їхніх оксидів. Поки достатньо розуміти ці

перетворення як окисно-відновні реакції; кількісні баланси розкиснення будуть розглянуті у спеціалізованих темах.



Не кожна умовно урівняна реакція одночасно описує фактичну переважну реакцію у складному багатокомпонентному розплаві. Для реального металу шва важливі температура, склад газу, активності компонентів і час взаємодії. Отже, рівняння, які ми складаємо на цьому етапі, потрібні насамперед для засвоєння хімічного змісту та стехіометрії.

Підсумок теми: визначення ступенів окиснення й електронного балансу дає змогу пояснити реакції металів з киснем, кислотами та розчинами солей. Положення металу в ряді активності допомагає робити якісні передбачення, але реальна швидкість і пасивація залежать від умов середовища та стану поверхні.

Питання для самоперевірки

1. Що називають окисником і відновником?
2. Визначте ступені окиснення Fe у FeO, Fe₂O₃ та Fe₃O₄.
3. Чому цинк витісняє мідь із розчину CuSO₄?
4. Чому мідь не виділяє H₂ із розведеної HCl?
5. Що означає пасивація?
6. Як електронний баланс допомагає урівняти реакцію окиснення магнію?

Під час зіставлення металів для зварювання недостатньо лише визначити, який із них активніше реагує з киснем. Потрібно врахувати, як утворені оксиди впливають на контакт між деталями, чи потрапляють вони в розплав і чи можуть бути видалені шлаком. Водночас кисень може окиснювати не тільки залізо, а й легувальні компоненти. Ці спостереження пояснюють, чому підготовка поверхні та газовий захист становлять важливу частину контролю хімічних процесів у зоні зварювання.

Використані джерела

- [1] Назарко І. С., Вічко О. І. Загальна хімія. Тернопіль: ТНТУ, 2019. Темі 7–8, с. 96–120.
- [2] Власенко Н. Є., Коваленко І. В., Потаскалов В. А. Хімія. Ч. 1. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. Розд. 10.
- [3] Хоботова Е. Б. Загальна та неорганічна хімія. Ч. 2. Харків: ХНАДУ, 2026. Розд. про властивості металів і сполук Феруму.
- [4] Петрушина Г. О., Пугач Л. І., Завріна С. В. Загальна та неорганічна хімія: навчальний посібник. Дніпропетровськ: Пороги, 2016. Розділ 1 «Загальна хімія»: окисно-відновні реакції.

[5] Степаненко О. М., Рейтер Л. Г., Ледовських В. М., Іванов С. В. Загальна та неорганічна хімія: у 2 частинах. Частина 1. Київ: Педагогічна преса, 2002. Розділ «Теорія окисно-відновлювальних реакцій».

ТЕМА 8

ОСНОВИ ЕЛЕКТРОХІМІЇ. КОРОЗІЯ МЕТАЛІВ ТА СПОСОБИ ЗАХИСТУ

1. Електрохімічні процеси і корозія металів

Мета лекції. Пояснити утворення електродних потенціалів, роботу гальванічних елементів та основи електролізу; сформулювати уявлення про механізми корозії та доступні способи її запобігання.

План лекції

1. Електроди й гальванічний елемент. 2. Електродні потенціали. 3. Електроліз і закон Фарадея. 4. Хімічна та електрохімічна корозія. 5. Кількісна оцінка корозійних втрат. 6. Захисні покриття й електрохімічний захист.

1.1. Перетворення хімічної енергії в електричну

Електрохімічні процеси відбуваються за участю окисно-відновних перетворень на межі електрода та електроліту. У гальванічному елементі самочинна реакція дає змогу отримати електричну енергію. На аноді відбувається окиснення, на катоді — відновлення; ці визначення залежать від характеру процесу, а не від знака електрода. У гальванічному елементі анод є негативним, катод — позитивним.

Як навчальну модель використовують елемент із цинковим та мідним електродами, зануреними у відповідні розчини солей і сполученими йонним містком. Під час замикання зовнішнього кола електрони переходять від цинку до міді через провідник. Сольовий місток забезпечує перенесення йонів і збереження електронейтральності розчинів, не дозволяючи всім реагентам одразу змішуватися.

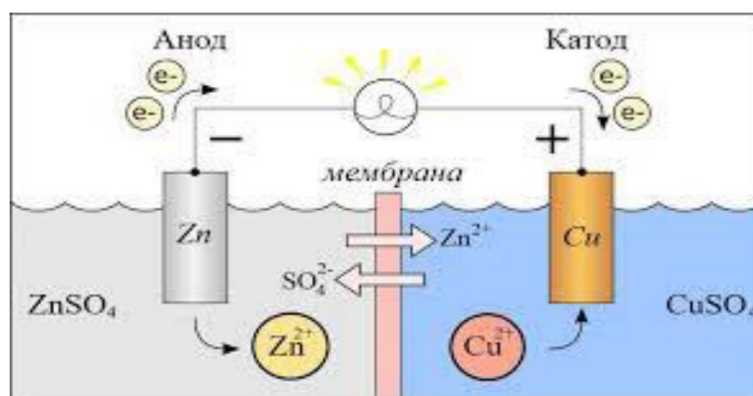


Рис. 8.1. Принципова схема цинково-мідного гальванічного елемента



Сумарне рівняння відбиває взаємодію цинку з йонами міді, але в електрохімічному джерелі енергії напівреакції фізично відокремлені. Саме це дає можливість електронам рухатися через зовнішнє коло і виконувати електричну роботу.

Система електродів у гальванічному елементі працює лише тоді, коли існують шляхи перенесення і електронів, і йонів. Якщо розірвати металевий провідник, електрони не рухатимуться через зовнішнє коло; якщо прибрати йонний зв'язок між напівелементами, у розчинах швидко накопичуватиметься надлишковий заряд. Отже, анод і катод виконують різні хімічні функції, а електроліт і зовнішній провідник забезпечують повний замкнений шлях заряду.

Джерела розділу: [1, с. 98–103]; [2, розд. 2]. [4, розд. про електрохімічні процеси]

2. Електродний потенціал і електрорушійна сила

2.1. Чому на металі виникає потенціал

Під час контакту металу з електролітом між його поверхнею та розчином виникає розподіл зарядів: частина йонів металу може переходити в розчин, а електрони лишаються в металі; можливий і зворотний процес. Так формується подвійний електричний шар. Потенціал окремого електрода вимірюють відносно обраного електрода порівняння, а не як самостійне абсолютне число.

Стандартні електродні потенціали характеризують відносну здатність відповідних окисно-відновних пар до відновлення за стандартних умов. У навчальних таблицях потенціал стандартного водневого електрода умовно приймають рівним нулю. Для пари Zn^{2+}/Zn потенціал приблизно $-0,76$ В, а для Cu^{2+}/Cu — $+0,34$ В; ці округлені табличні значення застосовують у простих задачах за $25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Таблиця 8.1. Приклади стандартних потенціалів відновлення

Електродна пара	E° , В
Zn^{2+}/Zn	$-0,76$
H^{+}/H_2	$0,00$
Cu^{2+}/Cu	$+0,34$

2.2. Обчислення ЕРС

Для цинково-мідного елемента електрорушійна сила за стандартних умов дорівнює різниці стандартних потенціалів катода й анода. Якщо умови відрізняються від стандартних, концентрації та температура змінюють потенціали; тоді використовують рівняння Нернста. У базовій програмі ФМБ достатньо опанувати стандартну різницю потенціалів.

$$E^{\circ}(\text{елемента}) = E^{\circ}(\text{катода}) - E^{\circ}(\text{анода}) \quad (8.3)$$

$$E^{\circ}(\text{Zn}|\text{Cu}) = 0,34 - (-0,76) = 1,10 \text{ В} \quad (8.4)$$

Розташування металу в ряді напруг допомагає якісно оцінювати можливі напрями реакцій у водних розчинах. Однак реальні корозійні процеси, що залежать від концентрації електроліту, кисню та пасивних плівок, не можна передбачити лише за стандартними потенціалами.

Число 1,10 В для стандартного цинково-мідного елемента отримане з табличних значень потенціалів, а не з безпосереднього додавання зарядів йонів. Воно стосується ідеалізованих стандартних умов, тоді як фактична напруга працюючого джерела залежить від концентрацій, внутрішнього опору та навантаження. У задачах ці чинники не враховують, якщо спеціально не введено потрібні вихідні дані. Стандартна електрорушійна сила допомагає визначати напрям можливого самочинного процесу, але не замінює характеристику реального акумулятора.

Джерела розділу: [1, с. 98–103]; [2, розд. 2]; [3, розд. 4].

3. Електроліз і закон Фарадея

3.1. Хімічна дія електричного струму

На відміну від гальванічного елемента, під час електролізу зовнішнє джерело струму примушує систему здійснювати електрохімічні перетворення. Катод у електролізері є негативним електродом, на якому відбувається відновлення; анод — позитивним, і на ньому відбувається окиснення. Продукти електролізу залежать від складу електроліту, матеріалу електродів і режиму процесу.

Для водного розчину CuSO_4 з інертним катодом у спрощеній навчальній моделі мідь може осаджуватися на катоді. Якщо анод мідний і розчиняється, на ньому відбувається окиснення Cu до Cu^{2+} , компенсуючи вилучення йонів із розчину. У водному розчині NaCl не можна очікувати осадження металевого натрію: на катоді насамперед відновлюється вода за відповідних умов.



3.2. Кількісна дія струму

Закон Фарадея пов'язує масу речовини, яка електрохімічно виділилася або розчинилася, із зарядом, пропущеним через електроліт. Заряд дорівнює добутку сили струму на тривалість. Для одержання одного моля електронів потрібний заряд, чисельно рівний сталій Фарадея $F \approx 96\,485$ Кл/моль. Якщо на утворення одного атома металу необхідно z електронів, кількість осадженого металу обернено пропорційна z .

$$Q = I \cdot t \quad (8.7)$$

$$m = M \cdot I \cdot t \cdot \eta / (z \cdot F) \quad (8.8)$$

Тут η — вихід за струмом у частках одиниці. У практичній роботі студентам задаватимуть z , M , I , t та η , тому розрахунок не вимагатиме визначення складного електродного механізму. Отримана маса є теоретичною або скоригованою за заданим виходом, а не гарантією конкретної товщини покриття без урахування площі.

Якщо електрохімічне нанесення покриття ведуть за сталої сили струму, маса осадженого металу пропорційна часу за незмінного виходу за струмом. При подвоєнні часу за інших незмінних умов теоретична маса осаду також подвоїться. Проте товщина покриття залежить від

площі поверхні та рівномірності розподілу струму. Саме тому у виробничих розрахунках крім закону Фарадея враховують густину струму, геометрію деталі й контроль фактичної товщини шару.

Джерела розділу: [1, с. 104–107]; [2, розд. 3].

4. Корозія як хімічний та електрохімічний процес

4.1. Що називають корозією

Корозія — руйнування металів та сплавів унаслідок їхньої хімічної або електрохімічної взаємодії з навколишнім середовищем. За механізмом розрізняють хімічну корозію, що може відбуватися, зокрема, у сухих газах за високих температур, та електрохімічну корозію в середовищах із йонною провідністю. Обидва процеси пов'язані з окисненням металу, проте електрохімічна корозія передбачає просторове розділення анодних і катодних ділянок.

4.2. Анодні та катодні ділянки

На анодній ділянці залізо переходить у розчин у вигляді йонів Fe^{2+} і віддає електрони. На катодній ділянці в аерованому нейтральному водному середовищі може відбуватися відновлення розчиненого кисню. В кислому середовищі можлива катодна реакція відновлення йонів Гідрогену з виділенням водню. Видима іржа утворюється внаслідок подальших перетворень сполук заліза за участю води та кисню.

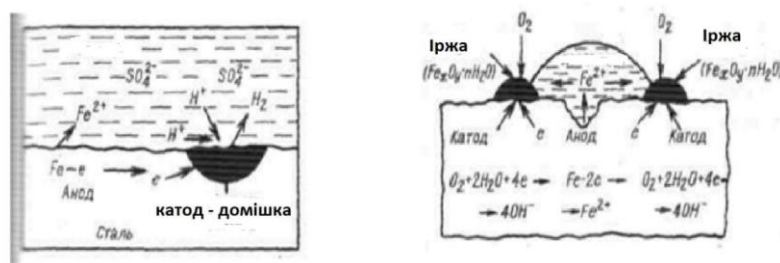


Рис. 8.2. Схематичне виникнення анодних і катодних ділянок під час корозії металу

Контакт двох металів із різними потенціалами в електроліті також може утворювати корозійну гальванічну пару. При цьому більш активний метал часто стає анодом. У зоні зварного з'єднання різниця в структурі, складі та стані поверхні може створювати неоднорідні ділянки, але конкретний напрям і швидкість корозії залежать від умов експлуатації.

Навіть на поверхні одного металу анодні й катодні ділянки можуть виникати через різну доступність кисню, неоднорідний склад або механічний стан. У вологому середовищі вода утворює електролітний шлях, а розчинений кисень за відповідних умов бере участь у катодному процесі. Подальше утворення малорозчинних продуктів не обов'язково зупиняє руйнування. Ці процеси пояснюють, чому в багатьох металоконструкціях корозія особливо помітна у місцях скупчення води та біля пошкоджених ділянок покриття.

Джерела розділу: [1, с. 120–122]; [3, розд. 2, 4–5].

5. Види корозії та кількісні показники

5.1. Як проявляється корозійне руйнування

Корозія може бути суцільною або місцевою. Під час суцільного руйнування метал втрачає масу на значній площі поверхні; за місцевої корозії небезпечною є концентрація ураження на невеликих ділянках — у вигляді плям, виразок або пітингів. Для зварних конструкцій додаткової уваги потребують місця утримання вологи, щілини та поверхні зі зміненим станом оксидної плівки.

Масові втрати під час випробувань найпростіше оцінювати як різницю мас зразка до та після видалення продуктів корозії за методикою. Якщо відомі площа й тривалість впливу середовища, обчислюють питомий показник масової швидкості корозії. Без правильного очищення зразка та врахування площі порівнювати результати різних випробувань некоректно.

$$K_m = \Delta m / (S \cdot t) \quad (8.11)$$

У формулі K_m — питомі втрати маси, Δm — втрата маси, S — площа досліджуваної поверхні, t — час. Наприклад, за грамами, квадратними метрами й годинами результат має одиницю г/(м²·год). Для наближеної оцінки зменшення товщини потрібна густина сплаву та припущення щодо рівномірності руйнування.

Таблиця 8.2. Ознаки корозійного руйнування

Вид	Що спостерігають	Наслідок для оцінювання
Суцільна	Втрати на значній площі	Можлива оцінка за масою та площею
Пітингова	Глибокі локальні ямки	Мала загальна втрата маси не виключає небезпеки
Щілинна	Ураження у вузьких зазорах	Потрібен контроль конструктивних зон

Кількісний показник за масою не відображає повною мірою небезпеки локальної корозії: виріб із невеликою загальною втратою маси може мати небезпечне локальне стоншення.

Окремо потрібно відрізнити випробування за втратою маси від аналізу небезпечного локального пошкодження. Якщо корозія рівномірна, питома масова швидкість дає змогу порівнювати зразки за однакових умов. Якщо виникають глибокі пітинги, важливішим показником може бути максимальна глибина ураження та розміщення пошкоджених ділянок. Саме тому інженерне рішення не повинне ґрунтуватися лише на одній числовій характеристиці без огляду поверхні.

Джерела розділу: [3, розд. 2, 9]; [1, с. 120–123].

6. Хімічні та електрохімічні способи захисту

6.1. Усунення контакту металу з середовищем

Один із поширених підходів — ізолювати металеву поверхню від води та агресивних речовин. Для цього застосовують лакофарбові, полімерні та металеві покриття. Якість підготовки поверхні, суцільність захисного шару та його стійкість в умовах експлуатації впливають на тривалість захисної дії. Наявність захисного покриття сама по собі не усуває потреби в контролі його стану.

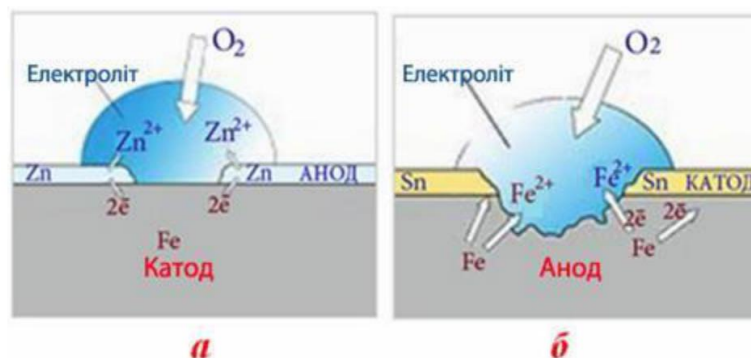


Рис. 8.3. Схематичне порівняння захисної дії різних металевих покриттів

6.2. Цинкове та олов'яне покриття сталі

Цинк є активнішим за залізо й у багатьох електролітах здатний виконувати роль жертвового анода: при пошкодженні покриття він може окиснюватися, захищаючи сталь електрохімічно. Олово в типових умовах благородніше за залізо; за порушення суцільності олов'яного шару оголена ділянка сталі може стати анодною і кородувати прискорено. Тому для оцінювання захисної дії важливий не лише матеріал покриття, а й факт наявності подряпин або пор.

6.3. Протекторний і катодний захист

За протекторного захисту до сталевій конструкції електрично присьднують активніший метал, який окиснюється замість основного. За катодного захисту зовнішнім джерелом струму потенціал конструкції підтримують у потрібному діапазоні. Обидва способи потребують фахового розрахунку й контролю в конкретному електроліті; у курсі загальної хімії вивчаємо тільки фізико-хімічний принцип.

Захисні покриття відрізняються механізмом дії. Лакофарбовий шар переважно ізолює основний метал від середовища. Цинковий шар окрім бар'єрної функції за багатьох умов може працювати протекторно, якщо в ньому виникла подряпина. Навпаки, для благороднішого покриття дефект суцільності може створювати небезпечну гальванічну пару з основною сталлю. Практичний вибір системи захисту завжди має враховувати склад експлуатаційного середовища.

Джерела розділу: [1, с. 123–125]; [3, розд. 11]. [5, розд. про корозію]

7. Захист зміною складу середовища

7.1. Інгібітори корозії

Інгібіторами називають речовини, невеликі добавки яких до корозійного середовища знижують швидкість руйнування металу. Вони можуть гальмувати анодні або катодні процеси, впливати на утворення захисних плівок чи блокувати активні ділянки поверхні. Ефективність конкретного інгібітора залежить від складу води, температури, концентрації та металу; не існує універсального інгібітора для всіх середовищ.

7.2. Конструктивні та технологічні заходи

Для металевих конструкцій важливі відведення води, зменшення щілин, належне очищення перед нанесенням покриттів та уникнення небажаних поєднань металів у вологому середовищі. У промислових системах можуть контролювати вміст кисню, кислотність та сольовий склад води. Проте зміна одного показника, наприклад рН, не гарантує відсутності корозії: її перебіг визначається сукупністю умов.

Таблиця 8.3. Способи обмеження корозії

Спосіб	Основний принцип	Типове обмеження
Лакофарбове покриття	Ізоляція від середовища	Важлива суцільність шару
Цинкування	Бар'єрний і можливий протекторний ефект	Потребує врахування середовища
Інгібітори	Уповільнення електродних процесів	Працюють не для всіх розчинів
Протекторний захист	Окиснення активнішого металу	Протектор витрачається

Для навчального вибору захисного підходу слід послідовно визначити матеріал конструкції, наявність рідкого електроліту, можливість пошкодження покриття, температуру та вимоги до обслуговування. Без таких вихідних даних порівняння «кращого» методу не буде обґрунтованим.

Під час підготовки поверхні перед фарбуванням важливо видаляти окалину, пухкі продукти корозії, жирові забруднення та залишки речовин, які перешкоджають зчепленню захисного шару з металом. Не слід підміняти цю задачу простим нанесенням товстого покриття на неочищену сталь: під шаром можуть зберігатися осередки корозії та волога. Ця логіка надалі буде використана в темах хімічної підготовки поверхонь і захисту зварних конструкцій.

Джерела розділу: [3, розд. 11–12]; [1, с. 123–125].

8. Підсумок і приклад оцінки корозійних втрат

8.1. Проста розрахункова модель

Навчальна умова: сталевий зразок площею $0,02 \text{ м}^2$ після випробування протягом 100 год втратив $0,40 \text{ г}$ металу. Питомий показник становить $0,20 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$. Це число застосовне саме до умов наведеного випробування; воно не є довговічним прогнозом для будь-якої реальної конструкції, особливо за місцевої корозії.

$$K_m = 0,40 / (0,02 \cdot 100) = 0,20 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{год}) \quad (8.12)$$

Електроліз і корозія використовують ті самі базові поняття — анод, катод, окиснення та відновлення. Відмінність полягає в призначенні системи: в електролізері потрібну реакцію забезпечує зовнішнє джерело електричної енергії, а при корозії небажані окисно-відновні перетворення руйнують матеріал. Для майбутнього зварника розуміння цих механізмів необхідне під час вибору та контролю захисту зварних конструкцій.

Під час реального контролю якості окремо перевіряють зварний шов, навколошовну зону та основний метал. Їхні мікроструктура та стан поверхні можуть відрізнятися, тому огляд тільки великої рівної поверхні не завжди достатній.

Питання для самоперевірки

1. Чому анод завжди є місцем окиснення?
2. Яке призначення сольового містка в гальванічному елементі?
3. Чим електроліз відрізняється від роботи гальванічного елемента?
4. Як за законом Фарадея пов'язані струм і маса осажденного металу?
5. Чому місцева корозія може бути небезпечною за малої втрати маси?
6. Що відбувається після подряпини на цинковому та олов'яному покриттях сталі?

За потреби оцінювати зміну товщини від питомих втрат маси можна перейти до геометричного показника лише за відомої густини та за припущення рівномірного зменшення металу. Якщо поверхня має локальні ураження, таке середнє значення не відображає найглибшої точки корозії. Для зварної конструкції додаткове значення мають форма шва, можливі щілини, стан навколошовної зони та правильність виконаного захисного покриття.

Використані джерела

- [1] Назарко І. С., Вічко О. І. Загальна хімія. Тернопіль: ТНТУ, 2019. Теми 7–8, с. 98–125.
- [2] Євсєєва М. В., Ранський А. П., Гордієнко О. А. Електрохімічні процеси: теорія та практикум. Вінниця: ВНТУ, 2017. Розд. 2–5.
- [3] Білоусова Н. А., Погребова І. С., Лінючев О. Г. Корозія та захист від корозії. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. Розд. 2–12.
- [4] Степаненко О. М., Рейтер Л. Г., Ледовських В. М., Іванов С. В. Загальна та неорганічна хімія: у 2 частинах. Частина 1. Київ: Педагогічна преса, 2002. Розділ про окисно-відновні та електрохімічні процеси.

[5] Булавін В. І. та ін. Практикум з основ загальної хімії: для лабораторних, семінарських занять і самостійної роботи. 3-тє вид., допов. і випр. Харків: НТУ «ХПІ», 2017. Розділи з електрохімії та корозії.

ТЕМА 9

ХІМІЧНА ПРИРОДА ТА ВЛАСТИВОСТІ ОСНОВНИХ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

1. Хімічні основи будівельного матеріалознавства

Мета лекції. Сформувати уявлення про зв'язок хімічного, мінералогічного й фазового складу будівельних матеріалів з їхньою структурою, міцністю, водостійкістю та довговічністю; навчитися пояснювати основні властивості природного каменю, мінеральних в'язучих, металів і полімерів з позицій хімії.

План лекції

1. Хімічний і мінералогічний склад; 2. будова й пористість; 3. природні кам'яні матеріали; 4. мінеральні та органічні матеріали; 5. вода й атмосферні чинники; 6. хімічна стійкість і вибір матеріалу; 7. елементарні кількісні характеристики.

1.1. Склад і будова як основа властивостей

Будівельний матеріал розглядають одночасно як речовину з певним хімічним складом і як структуровану систему, що містить кристалічні, аморфні та порові складові. Хімічний склад показує частки елементів або оксидів; мінералогічний — перелік мінералів, наприклад кварцу, кальциту, польових шпатів; фазовий — частки однорідних фаз. Навіть близькі за елементним складом матеріали можуть мати різні властивості, оскільки структура фаз, дефекти кристалічної будови й взаємне розміщення зерен визначають шляхи поширення тріщин і вологи. Для бетону важливе не лише співвідношення оксидів у цементі, а й утворення гідратних фаз та їх розміщення між заповнювачами.

За будовою розрізняють кристалічні матеріали з відносно впорядкованими ґратками та аморфні матеріали без дальнього порядку. Кварц SiO_2 і силікатне скло можуть містити однакові основні хімічні елементи, але поведуться інакше через відмінності просторової організації частинок. У природному камені потрібно враховувати зернистість, мікротріщини та контакти між мінералами. У цементному камені утворюється тонкодисперсна гідратна структура, яка з часом ущільнюється за умови достатнього зволоження. Навчальний висновок: паспортний хімічний склад є необхідним, але не вичерпним критерієм вибору матеріалу. Джерела розділу: [1, розд. 2–3]; [3, розд. про будову речовини].

Таблиця 9.1. Порівняння рівнів опису будівельного матеріалу

Рівень	Що встановлюють	Приклад практичного значення
Хімічний	Уміст елементів, оксидів та домішок	Оцінювання придатності сировини для цементу
Мінералогічний	Кварц, кальцит, доломіт, глинисті мінерали	Прогнозування розчинності й термічної поведінки
Фазовий	Співвідношення кристалічної, аморфної й гідратної фаз	Пояснення твердіння та усадки
Структурний	Пори, тріщини, контактні зони, розмір зерен	Оцінювання водопоглинання і міцності

2. Хімічні зв'язки та експлуатаційні властивості

У більшості мінеральних будівельних матеріалів поєднуються йонні й ковалентні складові хімічного зв'язку. У карбонатах існують міцні внутрішні зв'язки в карбонат-йоні й електростатична взаємодія з катіонами; у силікатах основою служать тетраедри SiO_4 , поєднані через спільні атоми Оксигену. Організація цих тетраедрів у ланцюги, шари або просторові каркаси зумовлює відмінності між глинистими мінералами, кварцом і багатьма природними породами. Метали мають металічний зв'язок, який пояснює електропровідність і можливість пластичного деформування; полімери — міцні ковалентні зв'язки в ланцюгах і слабші міжмолекулярні взаємодії.

Під дією навантаження будівельний матеріал деформується на різних рівнях: у кристалі, на межах зерен і в поровому просторі. Тому твердість окремого мінералу не тотожна міцності складеного з нього матеріалу. Наприклад, висока твердість кварцу не усуває небезпеки руйнування пісковика вздовж слабого цементувального матеріалу. У водонасичених породах значення має розчинення сполучної речовини й розклинювальна дія води в тріщинах. Хімічний аналіз необхідно поєднувати з дослідженням структури й умов експлуатації. Джерела розділу: [1, розд. 2–3]; [4, розд. 2].

3. Природні камені та їхні хімічні перетворення

Поширені кам'яні матеріали містять силікати, алюмосилікати, карбонати та їх суміші. Граніт складається переважно з кварцу, польових шпатів і слюд; вапняк — переважно з кальциту CaCO_3 ; доломітова порода — значною мірою з $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$. Кварц за звичайних умов малорозчинний у воді, а карбонат кальцію взаємодіє з кислотами з виділенням вуглекислого газу. Ця відмінність важлива під час вибору фасадного каменю для середовищ із підвищеною кислотністю. Результат польового тесту на карбонатність сам собою не замінює лабораторного встановлення складу.

Вуглекислий газ, розчинений у воді, утворює слабе кислотне середовище та сприяє переходу кальциту у розчинні гідрогенкарбонатні форми. Відповідні процеси пов'язані з природним карстом, зміною структури вапнякових матеріалів і перерозподілом солей у кладці. Польові шпати за тривалого вивітрювання можуть переходити в глинисті мінерали; швидкість процесу залежить від кислотності, температури та доступу води. Вивітрювання — це не один

процес, а сукупність реакцій гідролізу, окиснення, розчинення й перенесення продуктів. Джерела розділу: [1, розд. 3]; [4, розд. про Карбон].

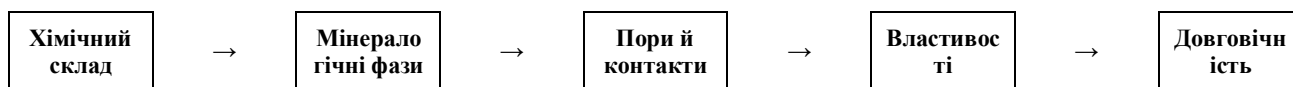
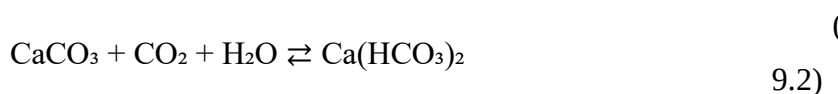
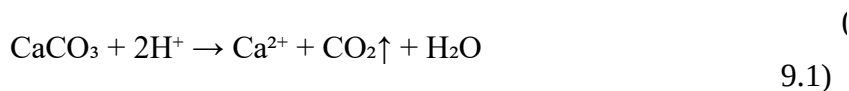


Рис. 9.1. Взаємозв'язок складу, структури й експлуатаційних характеристик

4. Пористість, вода і морозостійкість

Пори можуть бути відкритими, зв'язаними між собою або переважно замкненими. Відкрита капілярна система полегшує надходження води та розчинених солей; замкнені повітряні пори за певних умов підвищують опір циклам заморожування. Водопоглинання характеризує, скільки води матеріал утримує за визначеною методикою, а водопроникність — наскільки легко вода проходить крізь нього під дією перепаду тиску. Ці величини пов'язані, але не є взаємозамінними: матеріал може мати помітне водопоглинання без значної наскрізної проникності.

Замерзання води в порах супроводжується об'ємними та гідравлічними ефектами. Пошкодження визначаються ступенем насичення, розміром і зв'язністю пор, швидкістю охолодження та можливістю перерозподілу незамерзлої води. Наявність розчинених солей змінює температуру фазових переходів і створює додаткові ризики кристалізаційного тиску. Не можна оцінювати морозостійкість лише за однією хімічною формулою; потрібні нормовані випробування з урахуванням типу виробу. Джерело розділу: [1, розд. 2, 8].

$$W_m = (m_{\text{нас}} - m_{\text{сух}}) / m_{\text{сух}} \cdot 100 \% \quad (9.3)$$

5. Мінеральні, металеві й органічні групи матеріалів

Мінеральні будівельні матеріали охоплюють природний камінь, кераміку, скло, вапно, гіпс, цемент і бетони. Їхня поведінка багато в чому визначається силікатними, алюмосилікатними, карбонатними та сульфатними системами. Сталь і алюмінієві сплави виконують несучі функції, проте в контакт з водними електролітами та різнорідними металами можуть кородувати. Полімери, бітумні та лакофарбові композиції зазвичай застосовують для ізоляції, герметизації, склеювання й захисту; вони можуть змінювати властивості під дією ультрафіолету, кисню та температури.

Вибір матеріалу завжди пов'язаний з умовами роботи: кислотністю води, концентрацією солей, коливаннями температури, сонячним випромінюванням і потрібним строком служби. Наприклад, звичайний вапняковий камінь небажано застосовувати без захисту в умовах тривалого контакту з кислими розчинами; водостійкість гіпсових виробів відрізняється від

гідралічних цементних; деякі полімерні покриття несумісні з постійним високим нагріванням. Для відповідальних конструкцій остаточне рішення приймають на підставі нормативних вимог та випробувань. Джерела розділу: [1, розд. 6–9, 13–14]; [2, розд. 6].

6. Показники хімічної стійкості та контроль сировини

Хімічна стійкість означає здатність матеріалу зберігати прийнятні властивості в певному середовищі протягом заданого часу. Для цементного каменю небезпечними можуть бути вилугування кальцієвих сполук і деякі сульфатні впливи; для сталі — електрохімічна корозія; для карбонатного каменю — кислотне розчинення; для полімерів — окиснювальна деструкція та набухання у відповідних розчинниках. Один матеріал може бути стійким в одній рідині та нестійким в іншій. Тому формулювання «хімічно стійкий» без зазначення середовища й температури недостатнє.

Контроль будівельної сировини поєднує визначення вмісту основних оксидів, небажаних домішок і втрати маси під час прожарювання. Для карбонатної сировини останній показник пов'язаний передусім з виділенням CO_2 , але може включати й інші леткі компоненти. Для піску й щебеню оцінюють зерновий склад, пиловаті та глинисті частинки й наявність реакційноздатних мінералів. Результати лабораторних досліджень мають вказувати метод і умови, інакше порівняння матеріалів може бути некоректним. Джерела розділу: [1, розд. 2, 7–8]; [2, розд. 2].

7. Поверхневі процеси, сорбція та капілярне перенесення

Поверхня мінеральних зерен може взаємодіяти з водою та розчиненими йонами інакше, ніж внутрішні ділянки кристала. На поверхні глинистих мінералів виникають заряджені центри, що сприяють сорбції катіонів; тонкі водні плівки змінюють сили взаємодії між частинками й пластичність глинистої маси. У цементних системах поверхня дрібнодисперсних зерен визначає швидкість початкових реакцій, адсорбцію добавок і розвиток контактної структури. Чим тонший помел, тим більша доступна поверхня за однакової маси, але водопотреба та схильність до агломерації також можуть зростати. Тому збільшення дисперсності не слід вважати універсальним способом підвищення якості.

Капілярне всмоктування виникає внаслідок змочування стінок пор і дії поверхневого натягу. Для вузьких капілярів за однакових умов висота капілярного підняття може бути більшою, але швидкість фактичного перенесення залежить також від зв'язності пор і в'язкості рідини. У будівельній кладці капілярний підсос переносить солі з ґрунтової води в цеглу й розчин, після чого випаровування призводить до їх накопичення. Обробка гідрофобізатором змінює змочування, однак не обов'язково усуває проникність для водяної пари. Джерела розділу: [1, розд. 2, 3, 8]; [2, розд. 5].

Важливе також поняття питомої поверхні. Матеріал із великою питомою поверхнею часто швидше взаємодіє з розчином, адже реагент має доступ до більшої площі. Проте за наявності щільної плівки продуктів реакції процес може перейти в режим, керований дифузією

крізь шар продукту. Так, початкове швидке розчинення або гідратація ще не гарантує однакового темпу перетворення всього зерна. Цим пояснюється доцільність комплексного дослідження тонкості помелу, структури й кінетики твердіння.

8. Фазові перетворення та робота матеріалу при зміні температури

Під час нагрівання різні складові будівельного матеріалу можуть мати неоднакові коефіцієнти теплового розширення. На межі зерен виникають напруження, які за повторюваних циклів здатні створювати мікротріщини. Для природних порід важливі пропорції кварцу, польових шпатів і карбонатів, а також напрямок залягання шарів. Для цементного каменю значення мають ступінь насичення водою, пористість і зміни гідратних фаз. Тому температурну стійкість не можна визначити лише за температурою плавлення найбільш тугоплавкого мінералу.

Термічна обробка може навмисно змінювати фазовий склад. Під час виробництва кераміки спікання зв'язує зерна та формує нові фази; під час виробництва гіпсу часткове зневоднення створює реакційноздатний напівгідрат; під час виробництва цементу нагрівання приводить до появи клінкерних фаз. Усі ці процеси ілюструють спільний принцип: властивості залежать від шляху одержання не менше, ніж від початкового елементного складу. Джерела розділу: [1, розд. 4–7]; [4, розд. про неметали].

Для пористих матеріалів додатково виникає проблема поєднання теплових і вологісних деформацій. Нагріта волога поверхня може висихати швидше внутрішньої частини, що створює градієнт усадки. За різкого охолодження вода в порах може замерзати, а за подальшого відтавання — перерозподілятися. Довговічність визначається здатністю структури переносити повторювані процеси, а не одноразовим показником міцності.

9. Вибір матеріалу для конкретного середовища

Розглянемо три умовні ділянки будівлі: цоколь із можливим капілярним підсосом, суху внутрішню перегородку й відкрите сталеве огороження. Для цоколя особливо важливі водопоглинання, морозостійкість, солевмісність і захист від надходження ґрунтової вологи. Для внутрішньої перегородки на перший план можуть виходити маса, акустика, сумісність оздоблення та пожежні властивості. Для сталі потрібні оцінка атмосферної агресивності, відведення води й правильно підібрана система покриття. Однакова хімічна властивість не має однакової ваги в усіх трьох ситуаціях.

Навчальна послідовність вибору включає встановлення групи матеріалу, визначення ключових небезпечних середовищ, перевірку механізму можливого руйнування, ознайомлення з паспортними показниками та порівняння результатів нормованих випробувань. Якщо матеріал має кілька фаз, слід з'ясувати, яка саме фаза реагує з довкіллям. Якщо присутні відкриті пори, потрібно оцінювати не тільки рівноважну розчинність, а й транспортування води до реакційної поверхні. Джерела розділу: [1, розд. 2–3, 8–9]; [2, розд. 2].

Коректне технічне обґрунтування закінчується висновком із зазначенням вихідних даних і невизначеності. Якщо немає даних про склад підземної води, не можна достовірно стверджувати, що певний матеріал буде сульфатостійким у реальному ґрунті. Якщо не встановлено морозостійкості цегли, її не варто оцінювати лише за густиною. Хімічні знання створюють логіку вибору й показують, які саме додаткові випробування необхідні.

10. Порівняльна характеристика матеріалів і контрольний алгоритм

Для закріплення теми розглянемо умовний вибір матеріалу для трьох об'єктів: зовнішнього цоколя, внутрішньої перегородки й елемента металевого каркаса. У кожному випадку потрібно скласти перелік можливих хімічних взаємодій і встановити, які випробування потрібні до використання. Наявність води, солей і коливань температури підвищує значення пористості й морозостійкості цоколя. Для внутрішньої перегородки у стабільному сухому середовищі на перший план виходять інші характеристики. Для металевого елемента важлива можливість електрохімічної корозії та доступність поверхні для огляду.

Таблиця 9.2. Приклади зв'язку хімічного складу з потенційним ушкодженням

Матеріал	Уразливий процес	Показник, який доцільно перевірити
Карбонатний камінь	Розчинення в кислому середовищі	Склад води та кислотостійкість
Пориста кераміка	Перенесення солей і морозні цикли	Водопоглинання та морозостійкість
Цементний камінь	Вилугування і дія окремих солей	Проникність та склад середовища
Сталева конструкція	Електрохімічна корозія	Стан поверхні та клас атмосферного впливу

Під час лабораторного аналізу слід розрізняти матеріали з близькою густиною, але різною структурою пор. Наприклад, дві пористі цеглини можуть мати близьке загальне водопоглинання, але різну частку вузьких відкритих капілярів, що вплине на переміщення солей і вологи. Так само сполука CaCO_3 , наявна і в природному камені, і як продукт карбонізації в цементі, не забезпечує однакового механічного результату в різних структурах.

Систематизація за схемою «склад — структура — середовище — руйнування — контроль» допомагає переходити від хімічної формули до практичного висновку. Якщо відомості про фазовий склад або водний режим відсутні, їх потрібно позначити як необхідні для додаткового дослідження, а не підміняти припущенням. Джерела розділу: [1, розд. 2–3, 8–9]; [2, розд. 2].

11. Навчальний розрахунок складу та висновки

Нехай для виготовлення розчину використано 400 кг сухої суміші, яка містить 55 % піску, 30 % мінерального в'язучого та 15 % інших компонентів. Маса складових визначають як добутки загальної маси на їхні масові частки: 220, 120 і 60 кг. Перевірка матеріального балансу дає $220 + 120 + 60 = 400$ кг. Якщо окремо додають воду, її масу не можна включати до

початкових 400 кг сухої суміші. За таким самим принципом обчислюють маси оксидних компонентів у пробі сировини або домішок у технологічній партії.

Розрахунок показує, що хімічна характеристика і масовий баланс доповнюють один одного. Однак визначений відсотковий склад не повідомляє про розподіл пор, реальну поверхню зерен і швидкість реакцій. Для обґрунтованого вибору будівельного матеріалу послідовно встановлюють склад, структуру, агресивність середовища та потрібні експлуатаційні характеристики. Підсумок теми: хімічні перетворення, пористість, фазовий склад і водний режим разом визначають поведінку будівельних матеріалів у конструкції.

Питання для самоперевірки

1. Чим відрізняються хімічний, фазовий і мінералогічний склад?
2. Чому кварц і скло мають різні властивості за близького елементного складу?
3. Запишіть реакцію карбонату кальцію з кислотою.
4. Як пористість впливає на водопоглинання й морозостійкість?
5. Чому для оцінювання стійкості потрібно зазначати середовище експлуатації?
6. Які дані необхідні для матеріального балансу сухої суміші?

Використані джерела

[1] Новомлинець О. О., Корзаченко М. М., Сергєєв А. І. Будівельне матеріалознавство. Чернігів: НУ «Чернігівська політехніка», 2021. Розд. 2–3, 6–9, 13–14.

[2] Пшінько О. М., Савицький М. В., Зінкевич А. М. Відновлення експлуатаційної придатності бетонних, залізобетонних та кам'яних конструкцій. Дніпро, 2018. Розд. 2, 6.

[3] Хоботова Е. Б. Загальна та неорганічна хімія. Ч. 1. Загальна хімія. Харків: ХНАДУ, 2023. Розділи про будову й властивості речовин.

[4] Хоботова Е. Б. Загальна та неорганічна хімія. Ч. 2. Неорганічна хімія. Харків: ХНАДУ, 2026. Розділи про Карбон, Силіцій і метали.

ТЕМА 10

ПОВІТРЯНІ В'ЯЖУЧІ МАТЕРІАЛИ: ВАПНО ТА ГІПС. ХІМІЧНІ ПРОЦЕСИ ТВЕРДІННЯ

1. Загальна характеристика повітряних в'язучих

Мета лекції. Пояснити походження, випалювання, гасіння і карбонізацію повітряного вапна та фазові перетворення гіпсових в'язучих; навчитися складати відповідні хімічні рівняння й виконувати прості матеріальні розрахунки.

План лекції

1. Повітряні й гідралічні в'язучі; 2. кальцитова сировина та вапно; 3. гасіння і твердіння; 4. гіпсовий камінь і напівгідрат; 5. гідратація та кристалізація; 6. вплив води й домішок; 7. кількісний розрахунок.

1.1. Класифікація в'язучих і роль хімічних процесів

Мінеральними в'язучими називають порошкоподібні або пастоподібні речовини, здатні після змішування з водою чи іншим затворювачем утворювати пластичну масу, що згодом переходить у каменеподібний стан. Для повітряних в'язучих нормальне наростання міцності відбувається переважно в повітряному середовищі; для гідралічних — і на повітрі, і у воді. До поширених повітряних в'язучих належать будівельне повітряне вапно та гіпс. Назва групи не означає, що тверда речовина обов'язково перестає реагувати з водою, а характеризує типовий режим твердіння і водостійкість сформованого каменю.

Термін «схоплювання» позначає втрату сумішню початкової пластичності, а «твердіння» — подальше формування й зростання міцності. Це різні, хоча пов'язані етапи. Гіпс схоплюється переважно завдяки розчиненню напівгідрату, утворенню й росту кристалів дигідрату. Повітряне вапно в традиційних вапняних розчинах зміцнюється внаслідок висихання та повільної реакції кальцій гідроксиду з CO_2 повітря. Швидкість процесів залежить від розмірів частинок, водного режиму, температури, вологості та доступу реагентів. Джерела розділу: [1, розд. 6, 12]; [2, розд. про сполуки Кальцію].

Таблиця 10.1. Особливості повітряних в'язучих

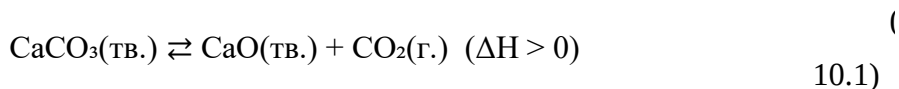
Ознака	Повітряне вапно	Будівельний гіпс
Сировина	Переважно вапняк CaCO_3	Гіпсовий камінь $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Теплова обробка	Випалювання з виділенням CO_2	Часткова дегідратація
Взаємодія з водою	Гасіння CaO до Ca(OH)_2	Гідратація напівгідрату до дигідрату
Основний процес твердіння	Висихання та карбонізація	Кристалізація дигідрату
Типове обмеження	Повільне твердіння в товщі вологого шару	Обмежена довготривала водостійкість

2. Хімія виробництва повітряного вапна

Сировиною є вапнякові та деякі інші карбонатні породи, придатність яких визначають за вмістом CaCO_3 і домішок. Під час випалювання кальцит розкладається з утворенням кальцій оксиду та вуглекислого газу. Розклад потребує підведення теплоти, а його перебіг залежить від

температури, парціального тиску CO₂, розміру шматків і теплообміну в печі. Надто великі шматки можуть залишатися недопаленими в серцевині, а тривалий надмірний нагрів може знижувати реакційну здатність утвореного CaO. Тому хімічна рівновага й технологічні параметри повинні розглядатися разом.

Вихідний кальцит має молярну масу приблизно 100 г/моль, кальцій оксид — 56 г/моль, а CO₂ — 44 г/моль. Отже, із 100 кг хімічно чистого CaCO₃ теоретично отримують 56 кг CaO й виділяється 44 кг CO₂; у реальному виробництві результат змінюють чистота сировини, ступінь розкладу та механічні втрати. Ці співвідношення застосовують у матеріальному балансі, а не як готовий норматив витрат палива. Домішки глинистих мінералів, магнієвих карбонатів та інші компоненти впливають на склад і властивості продукту. Джерело розділу: [1, розд. 6.3].



3. Гасіння вапна та особливості безпеки

Кальцій оксид активно взаємодіє з водою з утворенням кальцій гідроксиду. Реакція екзотермічна, тому суміш нагрівається; за неправильної організації процесу можливі локальне кипіння, розбризкування гарячої лужної суспензії та нерівномірне гасіння великих зерен. З технологічної точки зору важливо не тільки подати стехіометричну кількість води, але й забезпечити умови для повного протікання реакції та одержання вапняного тіста або порошку потрібних властивостей. Робочі режими встановлюють документацією на сировину та устаткування.

Гідроксид кальцію належить до основ, його водна суспензія має лужну реакцію. Це пояснює небезпеку контакту незахищеної шкіри та очей із вапняним тістом. Під час виконання лабораторної демонстрації потрібні окуляри, рукавички, захист від пилу й можливих бризок; не можна безпосередньо торкатися суміші, яка нагрівається. З погляду хімії контроль повноти гасіння важливий ще й тому, що залишкові зерна CaO можуть пізніше розширюватися у вже сформованому матеріалі та спричиняти дефекти. Джерела розділу: [1, розд. 6.3]; [2, розд. про кальцій].

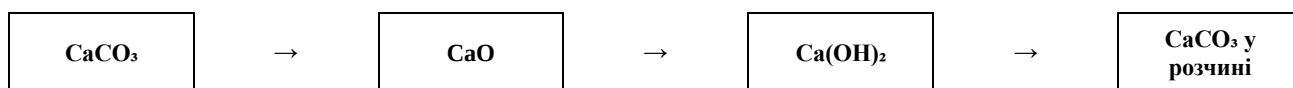
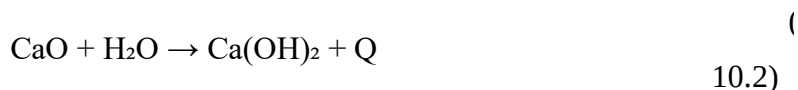


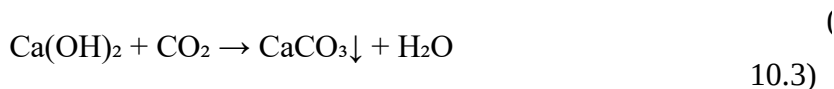
Рис. 10.1. Послідовність основних хімічних перетворень вапняного в'язучого

4. Карбонізація і твердіння вапняних розчинів

Основою традиційного повітряно-вапняного твердіння є реакція Ca(OH)₂ з вуглекислим газом повітря, наслідком якої стає утворення CaCO₃ і води. Ця реакція відбувається переважно там, куди надходить CO₂; у товстих шарах проникнення газу й видалення води можуть бути повільними. Висока вологість створює водну плівку, необхідну для перебігу реакції, однак

надмірне зволоження утруднює дифузію газу; за повного висихання процес також сповільнюється. Отже, швидкість карбонізації не збільшується безмежно зі зростанням вологості.

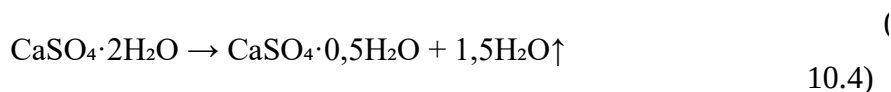
Пісок у вапняному розчині виконує функцію заповнювача, формує зерновий каркас і зменшує усадку. Він не замінює хімічного твердіння в'язучого, а змінює геометрію пор і розподіл напружень. Вапняні матеріали цінують за технологічність, паропроникність і сумісність із деякими історичними кладками, проте їх не можна без перевірки вважати придатними до тривалого перебування під водою. Для відновлення старої кладки сумісність нового розчину з основою може бути важливішою за максимальну початкову міцність. Джерела розділу: [1, розд. 6, 12]; [3, розд. 6].



5. Гіпс: сировина, випалювання та фазові переходи

Природний гіпсовий камінь переважно складається з кальцій сульфату дигідрату $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. За відповідного нагрівання він частково втрачає кристалізаційну воду, утворюючи напівгідрат $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ — основний компонент багатьох будівельних гіпсових в'язучих. Умови термообробки впливають на форму й реакційну здатність продукту. Подальша дегідратація може призводити до різних форм ангідриту; їхні властивості й потреба в активаторах відрізняються від звичайного будівельного гіпсу. Позначення «гіпс» без уточнення фази тому може бути неоднозначним.

Гіпсові в'язучі застосовують у штукатурних сумішах, внутрішніх перегородках, облицювальних виробках і сухому будівництві. Їхні переваги пов'язані з можливістю швидкого формування жорсткої кристалічної структури й відносно невеликими технологічними температурами виробництва порівняно з випалюванням цементного клінкеру. Водночас дигідрат CaSO_4 має помітну розчинність у воді, а тривале зволоження може погіршувати експлуатаційні характеристики гіпсового каменю. Застосування у вологих приміщеннях потребує відповідної конструктивної та матеріальної системи. Джерело розділу: [1, розд. 6.2, 12.3].

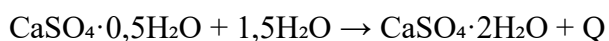


6. Гідратація, схоплювання і міцність гіпсового каменю

Після замішування напівгідрат частково розчиняється; розчин стає пересиченим щодо дигідрату, утворюються зародки нової фази, а зростання кристалів зв'язує частинки в просторовий каркас. Це і є хімічна основа схоплювання та подальшого твердіння. Тепловий ефект гідратації й швидкість кристалізації залежать від дисперсності порошку, температури та

добавок. Регулятори схоплювання змінюють кінетику розчинення, зародкоутворення або росту кристалів; у технології їх вводять за підтвердженими рецептурами.

Надлишок води потрібен для технологічності свіжої суміші, однак після висихання частина об'єму, зайнятого зайвою водою, перетворюється на пори. Тому збільшення водогіпсового відношення за інших рівних умов часто знижує міцність затверділого виробу. Слід розрізняти хімічно необхідну воду гідратації і фактичну воду замішування: остання зазвичай значно більша для забезпечення рухливості. Високоякісний виріб потребує контролю зернового складу, водовмісту, часу схоплювання, режимів сушіння та умов зберігання. Джерело розділу: [1, розд. 6.2].



(
10.5)

7. Чинники швидкості карбонізації та кристалізації

У повітряно-вапняному розчині карбонізація відбувається через газову дифузію CO_2 , розчинення газу у водній плівці та реакцію з кальцій гідроксидом. Якщо шар дуже товстий, поверхневі ділянки можуть ущільнюватися швидше, ніж внутрішні, а доступ газу в глибину поступово зменшується. За надмірної вологості пори зайняті водою і газова дифузія сповільнюється; за недостатньої — слабшає водне середовище реакції. Вплив температури також неоднозначний, оскільки одночасно змінюються швидкість реакції, розчинність газу й випаровування. Це пояснює, чому вапняні розчини потребують відповідних умов витримання.

Для гіпсу інша картина: розчинення напівгідрату створює пересичення щодо дигідрату, а кристали, що ростуть, переплітаються й утворюють твердий каркас. Добавка може уповільнювати розчинення або пригнічувати ріст певних граней кристалів, змінюючи час схоплювання та морфологію кінцевої структури. Мала кількість регулятора може діяти істотно, але реакція системи залежить від конкретного порошку. Практичний контроль передбачає визначення часу початку й завершення схоплювання, а не лише спостереження за видимим затвердінням. Джерело розділу: [1, розд. 6].

За одночасного використання кількох в'язучих можливі взаємні хімічні впливи. Наприклад, компоненти цементної системи змінюють лужність і йонний склад рідкої фази, тому умови кристалізації гіпсу можуть відрізнятися від чистої системи. У навчальному курсі важливо спочатку розібрати окремі механізми, а вже потім порівнювати складні суміші. Придатність комбінованого в'язучого встановлюють випробуваннями стабільності об'єму та міцності.

8. Дефекти вапняних і гіпсових виробів та їх хімічні причини

Пізнє розширення вапняного виробу інколи пов'язане з залишками негашеного CaO , які продовжують взаємодіяти з водою вже після формування шару. Проте тріщини у штукатурці

можуть мати й інші причини: велику усадку, різну вологість основи та розчину, невдалий зерновий склад або деформації конструкції. Тому за зовнішньою картиною не варто встановлювати механізм руйнування без уточнення умов приготування та зберігання матеріалу. Для повітряного вапна додатковим ризиком є повільне твердіння в ізольованих від CO_2 ділянках.

Гіпсові вироби чутливі до тривалого контакту з водою через розчинність дигідрату й зміни порової структури. Повторюване намокання й висихання може спричиняти поступову втрату поверхневої міцності. Велика початкова водопотреба створює підвищену капілярну пористість; надто швидке сушіння може викликати неоднорідні усадкові напруження. У виробництві застосовують контроль сировини й реологічних добавок, регламентовані режими сушіння та перевірку водопоглинання. Джерело розділу: [1, розд. 6, 12].

Для реставраційних робіт важлива сумісність нового в'язучого з історичним матеріалом. Дуже міцна або надто щільна ремонтна суміш на слабкій пористій кладці може змінити розподіл вологи та створити локальні напруження. Визначати рецептуру лише за міцністю на стиск недостатньо; потрібно оцінювати капілярне всмоктування, паропроникність, модуль деформації та хімічний склад солей. Ці вимоги поширюються на ремонт різних мінеральних систем.

9. Порівняльний матеріальний баланс двох в'язучих

Для виробництва будівельного вапна основним стехіометричним процесом є декарбонізація CaCO_3 , а для гіпсового в'язучого — часткове видалення кристалізаційної води. Молярна маса $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ становить приблизно 172 г/моль, напівгідрату — 145 г/моль, а води, що виділяється під час утворення напівгідрату, — 27 г/моль. Отже, зі 172 кг чистого дигідрату теоретично одержують 145 кг напівгідрату та 27 кг водяної пари. Цей результат не враховує домішок, неповної дегідратації й механічних втрат.

Якщо вихідна гіпсова сировина масою 500 кг містить 94 % дигідрату, його активна маса становить 470 кг. За схемою реакції теоретичний вихід напівгідрату дорівнює $470 \cdot 145 / 172 \approx 396,2$ кг, а маса видаленої води — близько 73,8 кг. Виробничий баланс доповнюють відомостями про фактичний фазовий склад, вологість і пилові втрати. Порівняння з вапняним виробництвом демонструє, що обидва процеси потребують теплоти, але мають різні газоподібні продукти й режими.

Під час розрахунків гасіння або гідратації слід відокремлювати стехіометричну кількість води від технологічного надлишку. Для CaO вода витрачається в екзотермічній реакції, а для напівгідрату — входить до кристалічної структури дигідрату. Водний баланс потрібний і для оцінювання майбутньої пористості. Джерело розділу: [1, розд. 6.2–6.3].

10. Методи контролю й порівняльна характеристика твердіння

Для повітряного вапна важливими показниками є активність, повнота гасіння, наявність недопалу чи перепалу та властивості готового тіста. Для гіпсових в'язучих визначають

тонкість помелу, водопотребу, терміни схоплювання й міцність за регламентованою методикою. Порівняння має враховувати, що вапно й гіпс твердіють за різними хімічними механізмами, а отже, один показник не може замінити всю систему контролю. Результати лабораторних випробувань на невеликих зразках також не описують автоматично поведінку товстого шару в конструкції.

Таблиця 10.2. Контрольні показники повітряних в'язучих

Операція	Вапно	Гіпс
Приймання сировини	Уміст CaCO_3 та домішок	Вміст дигідрату та домішок
Контроль процесу	Повнота випалювання й гасіння	Фазовий склад після дегідратації
Твердіння	Доступ CO_2 і водний режим	Гідратація та кристалізація
Якість виробу	Стійкість об'єму, міцність	Час схоплювання, міцність

Навчальна ситуація: вапняний штукатурний шар довго залишається м'яким у глибині, а гіпсова перегородка втратила поверхневу міцність після протікання. Для першого випадку потрібно перевірити товщину, вологість і доступ вуглекислого газу; для другого — тривалість зволоження й стан кристалічної структури. Не варто пропонувати однаковий спосіб прискорення твердіння для цих двох матеріалів, адже швидкість їхніх реакцій регулюють різні чинники.

Якщо матеріал призначений для ремонту історичної кладки, до стандартних показників додають оцінювання сумісності з основою: водопоглинання, паропроникності й деформаційної здатності. Хімічне пояснення повинне відповідати реальному режиму експлуатації. Джерела розділу: [1, розд. 6, 12]; [3, розд. 6].

11. Кількісний приклад: виробництво та гасіння вапна

Нехай 250 кг вапняку містить 92 % CaCO_3 . Маса активного карбонату дорівнює $250 \cdot 0,92 = 230$ кг. За рівнянням розкладу теоретична маса CaO становить $230 \cdot 56/100 = 128,8$ кг, а CO_2 — $230 \cdot 44/100 = 101,2$ кг. Якщо ступінь розкладу дорівнює умовним 95 %, фактичні розрахункові маси продуктів становитимуть 122,4 кг CaO й 96,1 кг CO_2 без урахування побічних процесів та втрат. Початкові 20 кг домішок у простій навчальній моделі залишаються в твердій фазі.

Для реакції гасіння 56 кг CaO теоретично потрібні 18 кг води. Отже, для 122,4 кг CaO стехіометрична кількість води становить 39,3 кг; фактична витрата на приготування вапняного тіста буде іншою через технологічні потреби. Висновок: матеріальний баланс дає кількість хімічно необхідних реагентів, проте не замінює вимог безпечного гасіння, контролю тепловиділення й якості продукту. Для гіпсу розрахунок виконують аналогічно за співвідношенням молярних мас напівгідрату, води та дигідрату.

Питання для самоперевірки

1. Чим повітряне в'язуче відрізняється від гідравлічного?
2. Які чинники визначають перебіг розкладу вапняку?
3. Чому гасіння вапна є екзотермічним і небезпечним без захисту?
4. Запишіть рівняння карбонізації вапняного розчину.

5. Яка фаза утворюється з дигідрату гіпсу під час часткової дегідратації?
6. Чому надмірне водогіпсове відношення може знижувати міцність?
7. Чим відрізняються стехіометрична й фактична витрати води?

Використані джерела

- [1] Новомлинець О. О., Корзаченко М. М., Сергеев А. І. Будівельне матеріалознавство. Чернігів, 2021. Розд. 6, 12.
- [2] Хоботова Е. Б. Загальна та неорганічна хімія. Ч. 2. Харків: ХНАДУ, 2026. Розділи про Кальцій і Сульфур.
- [3] Пшінько О. М., Савицький М. В., Зінкевич А. М. Відновлення експлуатаційної придатності бетонних, залізобетонних та кам'яних конструкцій. Дніпро, 2018. Розд. 6.

ТЕМА 11

ПОРТЛАНДЦЕМЕНТ: ХІМІЧНИЙ І МІНЕРАЛОГІЧНИЙ СКЛАД, ГІДРАТАЦІЯ ТА ТВЕРДІННЯ

1. Основи хімії портландцементного клінкеру

Мета лекції. Розглянути хімію клінкерних мінералів портландцементу, реакції гідратації та механізм утворення цементного каменю; пояснити роль гіпсу, водоцементного відношення й режиму догляду за бетоном.

План лекції

1. Сировина та клінкер; 2. головні мінерали; 3. гіпс і регулювання схоплювання; 4. реакції гідратації; 5. структура цементного каменю; 6. теплота, вода й догляд; 7. навчальні розрахунки.

1.1. Сировина та утворення цементного клінкеру

Портландцемент одержують тонким помелом клінкеру з контрольованою кількістю сульфатного компонента та, залежно від виду цементу, інших встановлених складників. Клінкер виробляють із сировинної суміші, що постачає насамперед CaO , SiO_2 , Al_2O_3 і Fe_2O_3 . Кальцій оксид надходить переважно з карбонатної сировини, а Силіцій, Алюміній та Ферум — із глинистих і коригувальних компонентів. Під час нагрівання відбуваються видалення вільної та зв'язаної води, декарбонізація і твердофазні реакції, а при високих температурах — формування рідкої фази й клінкерних мінералів.

Для навчального пояснення важливо не ототожнювати нагрівання суміші зі звичайним «висушуванням». Під час розкладу CaCO_3 утворюється CaO та виділяється CO_2 ; далі кальцій оксид реагує із силікатними й алюмінатними компонентами. Температурний режим, тонкість помелу сировини та хімічна однорідність впливають на повноту утворення клінкерних фаз. Окремі реакції можна подати стехіометрично, але реальне спікання є складним багатофазним процесом із перекриванням температурних інтервалів. Джерела розділу: [1, розд. 7.3]; [3, розд. про силікати].



2. Клінкерні мінерали й умовні цементні позначення

У цементній хімії часто використовують скорочення $\text{C} = \text{CaO}$, $\text{S} = \text{SiO}_2$, $\text{A} = \text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{F} = \text{Fe}_2\text{O}_3$, $\text{H} = \text{H}_2\text{O}$, $\hat{\text{S}} = \text{SO}_3$. Основні клінкерні мінерали — аліт, що містить переважно трикальцій силікат C_3S ; беліт, основою якого є двокальцій силікат C_2S ; трикальцій алюмінат C_3A та кальцій алюмоферитні фази, узагальнено представлені C_4AF . Ці символи позначають оксидні еквіваленти й не відображають усіх деталей реальної кристалічної структури й домішок. Кількість і реакційна здатність фаз визначають тепловиділення та темп набору міцності.

Аліт зазвичай істотно впливає на ранню міцність портландцементу, а беліт робить помітний внесок у пізніше наростання міцності. Алюмінатна фаза швидко взаємодіє з водою; без регулювання це могло б викликати надто швидку втрату рухливості. Алюмоферитні фази також гідратуються, але їхній вплив залежить від складу цементу й розчину в порах. Для оцінювання цементу не можна робити висновок лише за одним мінералом: потрібно враховувати сумарний склад, тонкість помелу, домішки, добавки та умови твердіння. Джерела розділу: [1, розд. 7.3–7.4]; [2, розд. про цементний камінь].

Таблиця 11.1. Основні фази портландцементного клінкеру

Фаза	Умовне позначення	Переважна роль
Аліт	C_3S	Істотний внесок у ранню міцність і тепловиділення
Беліт	C_2S	Помітний внесок у пізнішу міцність
Трикальцій алюмінат	C_3A	Висока початкова реакційна здатність; потребує сульфатного регулювання
Алюмоферитна фаза	C_4AF (умовно)	Участь у гідратації та формуванні структури

3. Регулювання схоплювання сульфатним компонентом

Під час помелу клінкеру додають кальцій сульфат у формах, установлених технологією. Сульфат-йони взаємодіють із продуктами гідратації алюмінатних фаз і сприяють контрольованому формуванню еtringіту. Такий механізм стримує некероване швидке схоплювання й дає час для змішування, транспортування та укладання бетонної суміші. Кількість сульфатів має бути узгоджена з реакційною здатністю цементу; просте припущення «чим більше гіпсу, тим краще» неправильне, оскільки надлишок або нестача можуть спричинити небажані технологічні та експлуатаційні ефекти.

Еtringіт є водним кальцій алюмосульфатом складного складу; в ранньому віці його утворення є нормальною частиною гідратації багатьох цементів. За інших умов, коли в уже затверділій структурі відбуваються реакції з додатковим надходженням сульфатів, формування нових фаз може супроводжуватися розширенням і пошкодженням. Отже, одна назва кристалічної фази не визначає автоматично характер процесу: потрібно врахувати час утворення, джерело сульфатів, доступний простір і вологість. Джерела розділу: [1, розд. 7.3–7.6]; [2, розд. 2].

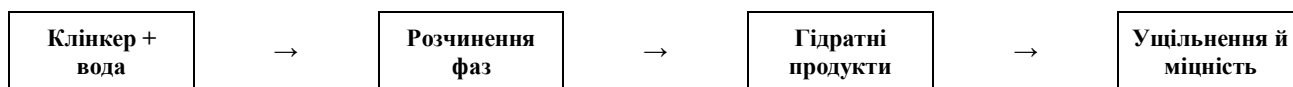


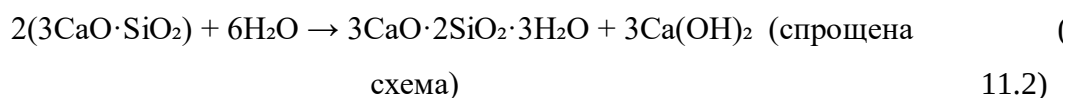
Рис. 11.1. Основні етапи гідратації та твердіння портландцементу

4. Гідратація силікатів і формування C–S–H

Після змішування цементу з водою частина мінералів починає розчинятися; у поровому розчині зростають концентрації йонів, виникають центри кристалізації та формуються гідратні продукти. Найважливішу роль у створенні міцного каркаса цементного каменю відіграє

кальцій-силікат-гідрат, який часто скорочено називають С–S–Н. Його склад змінний, тому звичайне рівняння гідратації є навчальною схемою, а не точною формулою реального продукту. Одночасно утворюється кальцій гідроксид $\text{Ca}(\text{OH})_2$, що підтримує високу лужність порової рідини.

Ущільнення структури відбувається в міру формування нових гідратних фаз між зернами цементу й заповнювача. Реакції потребують води та відповідної температури; передчасне висихання поверхні може зупинити гідратацію на частині ділянок і сприяти усадковим тріщинам. Надлишок води після випаровування залишає капілярні пори, тому важлива не максимальна витрата води, а збалансоване водоцементне відношення й належний догляд. Джерела розділу: [1, розд. 7.4–7.6]; [2, розд. 2, 6].



5. Міцність, пористість і водоцементне відношення

Водоцементне відношення В/Ц визначають як масу води, поділену на масу цементу в суміші. Зниження В/Ц за збереження необхідної укладальності зазвичай зменшує частку капілярних пор і сприяє підвищенню міцності та щільності. Проте занадто малий уміст води без відповідних пластифікуючих засобів погіршує ущільнення; недоущільнена суміш може містити великі повітряні пустоти. Тому В/Ц не можна оцінювати ізольовано від зернового складу, добавок і способу ущільнення.

Під час раннього твердіння важливими є температура, вологість і захист від випаровування. Інтенсивне тепловиділення в масивних елементах створює температурні градієнти, що можуть спричиняти тріщиноутворення. За низької температури хімічні реакції уповільнюються, а замерзання недостатньо зміцнілої суміші небезпечне. За високої температури рання швидкість реакцій може зростати, однак розвиток структури та тривала міцність залежать від конкретного режиму. Технологічні рішення повинні спиратися на характеристики цементу, склад бетону та вимоги нормативної документації. Джерело розділу: [1, розд. 7–8].

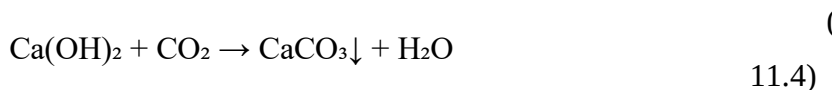
$$\text{В/Ц} = m(\text{води}) / m(\text{цементу}) \quad (11.3)$$

6. Карбонізація і хімічна стійкість цементного каменю

Кальцій гідроксид та інші кальцієвмісні гідратні фази можуть взаємодіяти з CO_2 у присутності вологи. У результаті карбонізації утворюється CaCO_3 , а лужність порового розчину на уражених ділянках знижується. У неармованих виробах поверхнева карбонізація може мати неоднозначний вплив на пористість, проте в залізобетоні зниження рН біля арматури послаблює пасивувальні умови й за доступу води та кисню підвищує ризик корозії. Швидкість

проникнення фронту карбонізації пов'язана зі щільністю, вологістю, тріщинуватістю та концентрацією CO₂.

Інші небезпечні процеси включають вилугування кальцієвих сполук м'якою проточною водою, вплив кислот і сульфатну агресію за певних умов. Хімічна стійкість цементного каменю залежить від складу цементу, щільності бетону й режиму його експлуатації. Не можна встановлювати придатність до агресивної води лише за маркою міцності. Для діагностики використовують аналіз середовища, стану поверхні, проникності та, за потреби, лабораторне вивчення змінених фаз. Джерела розділу: [1, розд. 7.6, 8.7]; [2, розд. 2].



7. Додаткові складники цементу й пуцоланові реакції

Поряд із портландцементним клінкером у складі різних цементів можуть застосовуватися встановлені мінеральні складники: гранульований доменний шлак, пуцоланові матеріали, вапняк та інші компоненти відповідно до виду цементу. Їх не слід розглядати як взаємозамінний інертний наповнювач. Деякі компоненти проявляють латентну гідравлічну активність, інші реагують із Ca(OH)₂, утвореним під час гідратації клінкеру, а ще інші переважно змінюють зернову упаковку та фізико-хімічні умови реакції. Кожний механізм впливає на швидкість формування структури та довговічність по-своєму.

Пуцоланова реакція потребує активного аморфного кремнезему або алюмосилікатних компонентів, води та кальцій гідроксиду. Її продукти можуть зменшувати частку вільного Ca(OH)₂ й ущільнювати поровий простір. Водночас дуже повільна реакція за низької температури може змінювати ранню міцність, а не кожна мінеральна добавка однаково ефективна в усіх цементних системах. Підбір повинен враховувати хімічний склад, реакційну здатність, тонкість помелу й умови випробування. Джерела розділу: [1, розд. 7–8]; [3, розд. про силікати].

Екологічну оцінку цементу також не можна обмежувати часткою клінкеру без аналізу всієї системи. Відмінності в транспорті матеріалів, помелі, умовах твердіння та потрібній витраті цементу змінюють результат. У навчальному курсі достатньо розрізнити джерела CO₂: декарбонізацію сировини, спалювання палива й енергетичні процеси. Кількісне оцінювання життєвого циклу потребує окремої методики й вихідних даних.

8. Кінетика гідратації та теплові ефекти

Гідратація цементу не відбувається з постійною швидкістю. На початку спостерігаються швидкі поверхневі процеси та формування первинних продуктів; згодом настають періоди різної інтенсивності реакцій, а доступ води й перенесення йонів крізь продукти гідратації поступово обмежують перебіг. Тепловиділення можна реєструвати калориметричними методами: форма кривої залежить від складу клінкеру, сульфатного регулювання, температури

та добавок. Така крива допомагає порівнювати сумісність цементу й хімічної добавки, але не замінює випробувань міцності.

У масивному бетоні теплота гідратації відводиться повільно, тому температура всередині конструкції може істотно відрізнитися від температури поверхні. Під час подальшого охолодження температурні деформації створюють розтягувальні напруження; за несприятливих умов формуються тріщини. Вибір виду цементу, розумне керування швидкістю твердіння й технологія догляду мають враховувати геометрію конструкції. Для тонких елементів, навпаки, небезпечне швидке висихання та нестача води на поверхні. Джерела розділу: [1, розд. 7.4, 8].

Твердість і міцність цементного каменю не визначають лише раннім тепловим ефектом. Система з інтенсивною початковою гідратацією може мати інший розвиток пізньої структури, ніж цемент з нижчим раннім тепловиділенням. Для відповідального застосування використовують нормовані випробування у встановленому віці й за визначених умов витримування. Правильне порівняння потребує однакових методик замішування та зберігання зразків.

9. Лабораторні показники цементу й інтерпретація

Основними контрольними показниками цементу є, зокрема, тонкість помелу, нормальна густота цементного тіста, терміни схоплювання, стабільність об'єму й міцність у встановлені строки. Кожний показник відповідає окремій властивості: нормальна густота відображає водопотребу за стандартною процедурою, час схоплювання — зміну пластичного стану, а міцність — опір зразка навантаженню в регламентованих умовах. Підвищення тонкості помелу може змінювати реакційну здатність, але водночас збільшувати водопотребу або впливати на тепловиділення.

Для навчального порівняння двох цементів необхідно використовувати однакові розчини, режими виготовлення й умови твердіння. Інакше відмінність результатів може пояснюватися не хімічним складом цементу, а різною водою, зерновим складом піску чи температурою. Якщо цемент розглядається для агресивного середовища, результати стандартної міцності потрібно доповнювати випробуваннями відповідної довговічності. Номінально високий показник міцності сам собою не гарантує опору сульфатній або кислотній дії. Джерела розділу: [1, розд. 7–8]; [2, розд. 2].

Контроль на будівельному майданчику також повинен включати умови зберігання цементу. Тривалий контакт порошку з вологою повітря сприяє частковій передчасній гідратації та грудкуванню; такий матеріал може поводитися інакше під час замішування. Наявність грудок не дає точної кількісної оцінки втрати активності, тому рішення щодо використання приймають за установленими процедурами контролю. Кінцевий висновок завжди пов'язаний із фактичним призначенням матеріалу.

10. Порівняння впливу складу цементу на довговічність

Вибір цементу для конкретної конструкції повинен враховувати не лише швидкість набору міцності, а й очікувану хімічну дію середовища. Для масивних елементів важливим може бути тепловиділення під час гідратації; для конструкцій у сульфатних ґрунтах — відповідна стійкість сформованого цементного каменю; для залізобетону в хлоридному середовищі — щільність, проникність і стан арматури. Не можна стверджувати, що один клас цементу універсально забезпечує найкращий результат за всіх цих умов.

Таблиця 11.2. Питання контролю цементу для різних умов

Умова	Критичний процес	Необхідна характеристика
Масивна конструкція	Тепловиділення і температурний градієнт	Теплота гідратації та режим догляду
Сульфатне середовище	Утворення вторинних сульфатних фаз	Придатність цементу і проникність бетону
Хлоридне середовище	Перенесення Cl^- до арматури	Проникність бетону та захисний шар
Висихання поверхні	Недостатня рання гідратація	Режим вологісного догляду

Під час дослідження міцності слід порівнювати зразки однакового віку й методики виготовлення. За зміни кількості води або умов зберігання результат може суттєво відрізнитися навіть для тієї самої партії цементу. Якщо оцінюють мінеральні складники, корисно зіставляти ранній і пізній розвиток міцності та враховувати температуру. Для оцінювання довговічності цього недостатньо без характеристик проникності та спеціальних випробувань агресивного впливу.

Кількісний і якісний контроль доповнюють одне одного: матеріальний баланс визначає частки оксидів і компонентів, а випробування показують поведінку конкретного матеріалу. Джерела розділу: [1, розд. 7–8]; [2, розд. 2].

11. Розрахунок складу й контроль матеріального балансу

Нехай для навчальної бетонної суміші задано 340 кг цементу та 170 кг води на умовний обсяг замісу. Водоцементне відношення $\text{В/Ц} = 170/340 = 0,50$. Якщо частину води додано разом із вологим піском, цю кількість потрібно включити до загальної маси води й відповідно зменшити масу води, що додається окремо. Наприклад, за 20 кг вологи в заповнювачі додаткова вода становитиме 150 кг; фактичне В/Ц за незмінного цементу залишиться 0,50 лише за правильного обліку всієї води.

Другий приклад стосується сировини. Якщо 100 кг сухого вапняку містить 90 % CaCO_3 , у простій моделі теоретична кількість CO_2 під час повного розкладу становить $90 \cdot 44/100 = 39,6$ кг. У цементному виробництві фактичні викиди включають також продукти спалювання палива та інші джерела, тому результат стехіометрії не слід називати повним вуглецевим балансом заводу. Підсумок: хімічні рівняння дозволяють оцінити масові співвідношення, але якість цементу і бетону встановлюють поєднанням аналізу складу, структури та нормованих випробувань.

Питання для самоперевірки

1. Назвіть чотири основні оксиди цементної сировини.
2. Поясніть умовні позначення C_3S , C_2S , C_3A і C_4AF .
3. Навіщо під час помелу клінкеру застосовують сульфатний компонент?
4. Що означає $C-S-H$ і чому його склад вважають змінним?
5. Як водоцементне відношення впливає на капілярну пористість?
6. Чим рання карбонізація вапняного розчину відрізняється від карбонізації залізобетону?
7. Які чинники впливають на розвиток міцності під час твердіння?

Використані джерела

- [1] Новомлинець О. О., Корзаченко М. М., Сергєєв А. І. Будівельне матеріалознавство. Чернігів, 2021. Розд. 7–8.
- [2] Пшінько О. М., Савицький М. В., Зінкевич А. М. Відновлення експлуатаційної придатності бетонних, залізобетонних та кам'яних конструкцій. Дніпро, 2018. Розд. 2, 6.
- [3] Хоботова Е. Б. Загальна та неорганічна хімія. Ч. 2. Харків: ХНАДУ, 2026. Розділи про сполуки Кальцію та Силіцію.

ТЕМА 12

БЕТОНИ ТА БУДІВЕЛЬНІ РОЗЧИНИ. ХІМІЧНІ ДОБАВКИ І РЕГУЛЮВАННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ

1. Загальна характеристика бетонних сумішей

Мета лекції. Розкрити хімічні й фізико-хімічні основи формування властивостей бетонної та розчинової сумішей, пояснити дію основних класів хімічних добавок і навчитися виконувати нескладні розрахунки складу з урахуванням вологості заповнювачів.

План лекції

1. Склад бетонів і розчинів; 2. вода, заповнювач і цемент; 3. водоцементне відношення; 4. пластифікатори; 5. сповільнювачі та прискорювачі; 6. повітровтягувальні й мінеральні добавки; 7. сумісність і контроль.

1.1. Бетон і будівельний розчин як багатофазні системи

Бетон складається з в'язучого, води, дрібного й, залежно від виду, крупного заповнювача та, за потреби, добавок. Будівельний розчин зазвичай не містить крупного заповнювача, але його властивості також визначаються співвідношенням в'язучого, піску, води й технологічних компонентів. У свіжій суміші одночасно існують тверді зерна, водна рідка фаза та включене повітря. Після початку гідратації цементу водний розчин і гідратні фази змінюють просторове розміщення: утворюється тверда система, в якій заповнювач з'єднується цементним каменем.

Важливо розрізняти фізичну роль заповнювача та хімічну роль в'язучого. Якісний інертний заповнювач утворює зерновий каркас, допомагає обмежувати усадку й зменшує витрату цементу, однак деякі мінерали заповнювача можуть вступати в небажані реакції з лугами порового розчину. Контактна зона навколо зерен часто має власну пористість і структуру, тому міцність бетону не визначається просто середнім арифметичним міцностей складових. На властивості впливають зерновий склад, форма зерен, чистота поверхні та спосіб ущільнення. Джерело розділу: [1, розд. 8].

2. Вода замішування й водоцементне відношення

Вода потрібна для хімічної гідратації цементу та забезпечення рухливості суміші. Однак не вся вода, введена під час замішування, зв'язується хімічно: частина заповнює капілярний простір і може випаровуватися. За підвищеного В/Ц зазвичай зростає капілярна пористість і проникність затверділого бетону, що впливає на міцність, стійкість до заморожування та проникнення агресивних речовин. Зниження В/Ц без урахування реології, навпаки, може призвести до поганого ущільнення й утворення великих технологічних пустот.

Вода для бетону не повинна містити шкідливих кількостей компонентів, які порушують твердіння або погіршують довговічність конструкції. Особливу увагу приділяють солям, органічним домішкам і хлоридам у залізобетоні. Навіть якщо певна вода не викликає помітної зміни ранньої міцності, вона може впливати на довгострокову корозійну стійкість арматури.

Придатність води встановлюють нормативними випробуваннями, а не лише візуальною прозорістю. Джерела розділу: [1, розд. 8.2–8.3]; [2, розд. 2].

$$В/Ц = m(\text{води загальної}) / m(\text{цементу})$$

(12.1)

3. Пластифікатори і суперпластифікатори

Пластифікуючі добавки призначені для поліпшення рухливості суміші або для зниження витрати води за збереження потрібної консистенції. Багато суперпластифікаторів діють завдяки адсорбції молекул на поверхні цементних частинок та їхньому диспергуванню. Електростатичне відштовхування й просторові перешкоди між адсорбованими полімерними ланцюгами зменшують схильність зерен до утворення агрегатів. Унаслідок цього частина води, раніше утримуваної всередині агрегатів, стає доступною для забезпечення текучості суміші.

Ефективність добавки залежить від хімічного складу й тонкості цементу, кількості сульфатів, температури, порядку введення і часу після замішування. Одна й та сама дозування не гарантує однакової рухливості для різних цементів. Надлишок деяких добавок може спричинити розшарування, затримку твердіння або підвищене повітровтягування. Під час лабораторного підбору складу вимірюють не лише початкову рухливість, а й її збереження, час схоплювання, міцність і, за потреби, повітровміст. Джерела розділу: [1, розд. 8.9]; [3, розд. про розчини й поверхневі явища].

Таблиця 12.1. Класи добавок і головне призначення

Група	Основний механізм або дія	Контрольний показник
Пластифікуючі	Диспергування цементних частинок	Рухливість і витрата води
Сповільнювачі	Уповільнення окремих етапів гідратації	Початок і кінець схоплювання
Прискорювачі	Прискорення ранніх реакцій та набору міцності	Рання міцність і тепловиділення
Повітровтягувальні	Формування контрольованих дрібних бульбашок	Повітровміст і морозостійкість
Гідрофобізувальні	Зменшення змочування або капілярного водопоглинання	Водопоглинання та сумісність

Склад суміші	→	Дія добавок	→	Гідратація	→	Структура бетону
--------------	---	-------------	---	------------	---	------------------

Рис. 12.1. Шлях формування властивостей цементної суміші

4. Сповільнювачі, прискорювачі та ризики несумісності

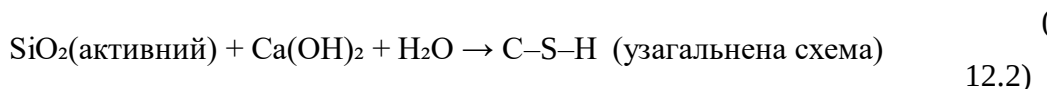
Сповільнювачі схоплювання застосовують, коли необхідно подовжити технологічний час роботи зі свіжою сумішшю. Вони можуть впливати на розчинення цементних фаз, адсорбуватися на поверхні продуктів гідратації або затримувати кристалізацію. За спекотної погоди це може допомагати зберігати укладальність, проте вибір речовини та її кількості потребує перевірки. Надмірне сповільнення здатне порушити графік розпалублення, змінити ранню міцність і викликати неоднорідність властивостей у різних зонах конструкції.

Прискорювачі використовують для зміни темпу ранньої гідратації або формування міцності, але їх слід відрізняти від засобів проти замерзання та від заходів теплового захисту суміші. Не всі хімічні прискорювачі придатні для залізобетону: компоненти, які підвищують уміст хлоридів, можуть збільшувати ризик корозії арматури. Сумісність із конкретним цементом і комплексом інших добавок визначають випробуваннями. Застосування кількох засобів не гарантує додавання їхніх позитивних ефектів: можливі взаємне пригнічення дії або небажана зміна повітровмісту. Джерела розділу: [1, розд. 8.9]; [2, розд. 2].

5. Повітровтягування, мінеральні добавки й пуцоланові реакції

Повітровтягувальні добавки утворюють у цементному камені систему дрібних, відносно рівномірно розподілених повітряних пор. За правильно підібраних параметрів вони створюють простір для перерозподілу води під час циклів заморожування й відтавання. Проте надмірне повітровтягування зменшує ефективну несучу площу цементного каменю і може знижувати міцність. Не слід ототожнювати контрольовані дрібні повітряні пори з великими дефектами неякісного ущільнення — їхній вплив на експлуатацію різний.

Мінеральні добавки можуть бути інертними наповнювачами, латентно-гідралічними або пуцолановими компонентами. Пуцоланові матеріали за наявності води реагують із $\text{Ca}(\text{OH})_2$ та утворюють додаткові гідратні продукти, зокрема кальцій-силікат-гідрати. Така реакція може змінювати пористість і довговічність, однак її швидкість залежить від дисперсності й реакційної здатності матеріалу. Не кожний тонко подрібнений порошок є пуцоланом: цей висновок потребує визначення складу й реакційної активності. Джерела розділу: [1, розд. 7.4, 8.9]; [3, розд. про Силіцій].



6. Регулювання властивостей будівельних розчинів

Для штукатурних і кладочних розчинів особливо важливими є пластичність, водоутримувальна здатність, адгезія до основи й відповідність міцності матеріалу кладки. Розчини з повітряним вапном часто пластичніші, але твердіють за інших хімічних механізмів, ніж цементні. У змішаних вапняно-цементних композиціях одночасно відбуваються гідратація цементних фаз і поступова карбонізація вапна. Введення полімерних або ефіроцелюлозних компонентів може покращувати реологію та водоутримання, але не усуває потреби в правильній підготовці поверхні.

Адгезію не можна повністю описати одним показником хімічної активності: вона залежить від змочування поверхні, всмоктування води, мікрорельєфу, пилу та сумісності деформацій основи і ремонтного матеріалу. На сильно водопоглинальній основі суміш може втрачати воду занадто швидко, що заважає нормальному розвитку гідратної структури. На

гладкій і забрудненій поверхні можливий відрив за контактною межею. Тому складу розчину має відповідати технологія нанесення й догляду. Джерела розділу: [1, розд. 8.8–8.9]; [2, розд. 6].

7. Реологія бетонної суміші та збереження рухливості

Рухливість свіжої суміші визначається не лише масою води, а й взаємодією поверхонь цементних зерен, дрібного заповнювача та молекул добавок. У щойно приготовленій суміші частинки можуть утворювати агрегати, а під дією механічного перемішування й пластифікуючих речовин частина агрегатів руйнується. У процесі гідратації зростає кількість дрібних продуктів реакції та змінюється склад рідкої фази, тому рухливість поступово зменшується. Здатність суміші зберігати потрібну консистенцію упродовж заданого часу є окремою технологічною характеристикою.

Під час виробничого контролю розрізняють початкову рухливість, втрату рухливості з часом та схильність до розшарування. Дуже текуча суміш може бути технологічно незадовільною, якщо крупний заповнювач осідає, а на поверхні накопичується вода. Суперпластифікатор дає змогу зменшити В/Ц або підвищити рухливість, але зміна часу замішування та порядку введення добавки може істотно впливати на результат. Джерела розділу: [1, розд. 8.3, 8.9]; [3, розд. про розчини].

Важливо також урахувати температурний режим. Висока температура здатна прискорювати ранні реакції та випаровування води, тому втрата рухливості може збільшуватися. За низької температури інтенсивність гідратації змінюється інакше, однак це не усуває ризику розшарування або неправильного дозування добавок. Для відповідальної роботи технологію перевіряють на фактичних матеріалах і в температурному діапазоні, близькому до виробничого.

8. Контактна зона заповнювача та небажані реакції

Межа між поверхнею заповнювача і цементним каменем є особливою ділянкою структури бетону. На її властивості впливають форма зерна, шорсткість, пило-глинисті частинки, водовідділення й умови формування гідратних продуктів. Якщо поверхня заповнювача забруднена, контакт може бути слабшим навіть за нормального хімічного складу цементу. Наявність надлишкової води поблизу зерен іноді сприяє утворенню більш пористої контактної зони. Ущільнення суміші й оптимізація зернового складу допомагають зменшувати такі дефекти.

Деякі мінеральні форми кремнезему здатні реагувати з лужними компонентами порової рідини. За наявності вологи продукти реакції можуть набухати й викликати внутрішні напруження. Тому придатність піску або щебеню не визначається лише його насипною густиною чи механічною міцністю. За відповідних умов експлуатації потрібні оцінка мінералогічного складу й установлені випробування лужної реакційної здатності. Джерела розділу: [1, розд. 8.2–8.7]; [2, розд. 2].

Зернова упаковка також має хімічний наслідок: зміна загальної поверхні заповнювача впливає на потребу в цементному тісті й добавках. Дуже дрібний пісок за іншого рівного складу збільшує поверхню, яку має змочити в'язуча система, і може потребувати коригування води чи пластифікатора. Слід аналізувати не тільки теоретичну міцність цементного каменю, а й його кількість, необхідну для заповнення пустот між зернами.

9. Контроль виробничого замісу й коригування рецептури

Під час виробництва бетону необхідно обліковувати фактичну вологість заповнювачів. Якщо сухий пісок із розрахунковою масою 900 кг має поверхневу вологу 3 %, він вносить близько 27 кг води. За загальної розрахункової потреби у воді 165 кг масу води, яку додають окремо, у спрощеній моделі зменшують до 138 кг. Але у виробництві потрібно розрізняти повну та поверхневу вологість, оскільки внутрішню поглинена вода не завжди однаково бере участь у визначенні ефективного В/Ц. Методика коригування має бути єдиною для всіх замісів.

Якщо до суміші вносять хімічну добавку у вигляді розчину, слід знати його концентрацію й дозування. Наприклад, для 360 кг цементу доза 0,75 % сухої речовини означає 2,70 кг активного компонента. За масової частки сухої речовини в товарному розчині 30 % його маса становить $2,70/0,30 = 9,0$ кг; з цією кількістю вводиться 6,3 кг води. Якщо її не врахувати, фактичне водоцементне відношення збільшиться. Цей приклад пояснює необхідність чітко розрізняти дозування «за товарним продуктом» і «за сухою речовиною».

Для приймального контролю потрібні кілька незалежних показників: рухливість, однорідність, повітрявміст, температура свіжої суміші й міцність контрольних зразків у встановлені строки. Вибір інших випробувань залежить від призначення конструкції та її середовища. Хімічна добавка вважається ефективною для конкретної рецептури лише тоді, коли досягнута потрібна сукупність характеристик, а не один показник.

10. Комплексний приклад підбору складу бетонної суміші

Під час розроблення нового складу бетону можна поставити три взаємопов'язані завдання: забезпечити рухливість, обмежити водоцементне відношення та зберегти потрібний темп твердіння. Якщо потрібну рухливість отримують додаванням надлишкової води, за інших однакових умов можуть зростати капілярна пористість і проникність. Суперпластифікатор дає можливість змінювати реологію без такого самого збільшення В/Ц, але його дію слід перевіряти на конкретному цементі. Контроль не може обмежуватися тільки осадкою конуса або іншою однією характеристикою свіжої суміші.

Таблиця 12.2. Зміна складу й можливі наслідки

Зміна	Можлива перевага	Показник ризику
Підвищення водовмісту	Краща початкова рухливість	Пористість і міцність
Додавання суперпластифікатора	Менша водопотреба	Сумісність і розшарування
Повітровтягування	Кращий опір морозним циклам	Надмірний повітрявміст
Пуцоланова добавка	Додаткові гідрати і зміна пористості	Рання міцність і режим догляду

У навчальному прикладі в двох сумішах використовують однакові 320 кг цементу. Першій суміші потрібно 192 кг води для заданої рухливості ($V/C = 0,60$), а другій після перевіреного застосування добавки — 160 кг ($V/C = 0,50$). За рівних інших умов можна очікувати зміну пористості, але фактична міцність залежатиме також від ущільнення, заповнювачів, температури й догляду. Тому для правильного висновку потрібно виготовити та випробувати контрольні зразки.

Підсумковий алгоритм підбору: встановити експлуатаційні вимоги, вибрати сумісні матеріали, розрахувати склад, зробити пробний заміс, перевірити рухливість і повітровміст, випробувати міцність і за потреби довговічність. Джерело розділу: [1, розд. 8].

11. Навчальний матеріальний баланс і висновки

Розглянемо заміс із 300 кг цементу, 750 кг сухого піску та розрахунковими 150 кг усієї води. V/C становить 0,50. Якщо на майданчик надійшов пісок із вологістю 4 % від сухої маси, він містить близько 30 кг води; тоді маса додаткової води, за прийнятою навчальною моделлю, дорівнює $150 - 30 = 120$ кг. У реальній рецептурі необхідно розрізняти повну, поглинену та поверхневу вологу заповнювачів і застосовувати методику підприємства. Неправильний облік води змінює фактичне V/C навіть за точно відміряного цементу.

Якщо добавку дозують у кількості 0,8 % від маси цементу, її маса за умовного прийняття відсотка для товарного продукту дорівнює $300 \cdot 0,008 = 2,4$ кг. Якщо ж у паспорті нормовано вміст сухої речовини, а продукт є водним розчином, обчислення потрібно виконувати за його концентрацією і враховувати воду самого продукту. Підсумок: хімічні добавки змінюють кінетику, дисперсність і структуру суміші, але їхню ефективність підтверджують комплексом технологічних та експлуатаційних випробувань.

Питання для самоперевірки

1. Які фази одночасно присутні у свіжій бетонній суміші?
2. Що таке водоцементне відношення і як урахувати воду в заповнювачі?
3. Поясніть фізико-хімічний механізм пластифікації.
4. Чому слід випробовувати сумісність добавки з конкретним цементом?
5. Чим контрольовані повітряні пори відрізняються від пустот неякісного ущільнення?
6. Що називають пуцолановою реакцією?
7. Які чинники визначають адгезію будівельного розчину?

Використані джерела

[1] Новомлинець О. О., Корзаченко М. М., Сергеев А. І. Будівельне матеріалознавство. Чернігів, 2021. Розд. 7–8.

[2] Пшінько О. М., Савицький М. В., Зінкевич А. М. Відновлення експлуатаційної придатності бетонних, залізобетонних та кам'яних конструкцій. Дніпро, 2018. Розд. 2, 6.

[3] Хоботова Е. Б. Загальна та неорганічна хімія. Ч. 1–2. Харків: ХНАДУ, 2023, 2026. Розділи про розчини й силікати.

ТЕМА 13

СИЛІКАТНІ, КЕРАМІЧНІ ТА СКЛЯНІ БУДІВЕЛЬНІ МАТЕРІАЛИ

1. Хімічні основи силікатних матеріалів

Мета лекції. Пояснити хімічну будову силікатів, перетворення глини під час випалювання, утворення та властивості скла й силікатних виробів, показати роль високотемпературних реакцій і пористості у формуванні властивостей.

План лекції

1. Силікатні структури; 2. глиниста сировина; 3. сушіння й випалювання кераміки; 4. керамічні вироби; 5. силікатна цегла; 6. скло й склокристалічні матеріали; 7. стійкість і дефекти.

1.1. Силіцій та будова силікатних систем

Основою багатьох кам'яних, керамічних і скляних будівельних матеріалів є сполуки Силіцію з Оксигеном. Визначальним структурним мотивом є тетраедр, у центрі якого перебуває атом Силіцію, а у вершинах — атоми Оксигену. З'єднуючись вершинами, тетраедри можуть утворювати ланцюги, шари й тривимірні каркаси. Алюміній здатний частково замінювати Силіцій у відповідних структурах, а катіони Натрію, Калію, Кальцію та Магнію впливають на електронейтральність і властивості кристалічної або склоподібної системи.

У природній сировині часто зустрічаються кварц, польові шпати й глинисті мінерали. Кварц має просторову сітку Si–O, глинисті мінерали — переважно шарувату будову, а натрієві та кальцієві силікати можуть входити до складу скла й силікатних виробів. Мінералогічний аналіз потрібний тому, що однакові оксидні частки SiO_2 і Al_2O_3 за різного фазового складу не гарантують однакової пластичності чи режиму випалювання. Джерела розділу: [1, розд. 3–5]; [2, розд. про Силіцій].

2. Глини, пластичність і підготовка керамічної маси

Глина є природною дисперсною сировиною, що містить глинисті мінерали, а також кварц, карбонати, оксиди Феруму та інші домішки. Шаруваті структури й тонкодисперсність значною мірою зумовлюють її пластичність після змішування з водою. Під час формування виробу вода розташовується між частинками й на їхній поверхні, забезпечуючи можливість деформації маси. Надлишок тонкодисперсних пластичних компонентів може збільшувати усадку й ризик тріщин під час сушіння; непластичні добавки, зокрема шамот, здатні обмежувати деформації.

Підготовка маси охоплює дозування, подрібнення, змішування, зволоження й формування. Хімічний склад сировини впливає на температуру спікання, колір черепка та схильність до утворення склоподібної фази. Домішки карбонатів, які не встигли повністю розкластися чи рівномірно розподілитися, інколи спричиняють локальні дефекти виробу. Тому правильна технологія передбачає не лише формування геометрії, а й контроль однорідності сировини та розміру включень. Джерело розділу: [1, розд. 4.2–4.3].

3. Термічні перетворення під час випалювання кераміки

На початковому етапі нагрівання видаляється фізично зв'язана й частина міжшарової води, далі відбуваються дегідроксилювання глинистих мінералів і перебудова їхньої структури. Для каолініту спрощено показують утворення метакаоліну з виділенням води, однак реальний процес включає широкий температурний інтервал і зміну структури речовини. При подальшому нагріванні формуються нові кристалічні фази та склоподібний зв'язувальний компонент, а пори частково закриваються завдяки спіканню.

Випалювання має бути узгоджене зі складом маси: недостатня температура або витримка можуть залишити надмірну пористість і низьку міцність, а перегрів — спричинити деформацію й надмірне склування. Особливо важливо контролювати проходження температурних областей фазових перетворень кварцу, оскільки пов'язані з ними об'ємні зміни створюють термічні напруження. Різка зміна температури без урахування товщини й форми виробу підвищує ризик тріщин. Джерела розділу: [1, розд. 4.3–4.11]; [2, розд. про Силіцій].

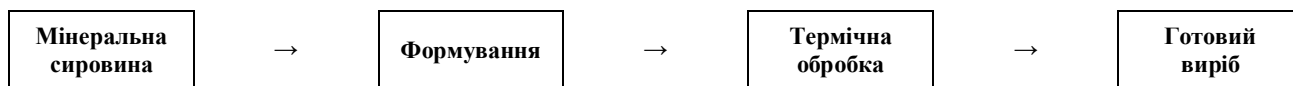
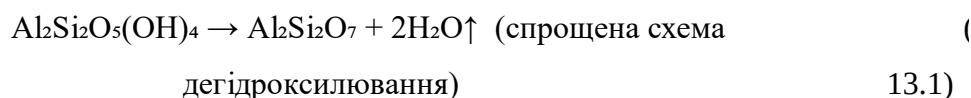


Рис. 13.1. Основні технологічні етапи одержання силікатного матеріалу

4. Керамічні матеріали і контроль пористості

Будівельна кераміка охоплює рядову та лицьову цеглу, керамічні камені, плитку, черепицю, санітарно-технічні й спеціальні вироби. Властивості різняться за щільністю, водопоглинанням, морозостійкістю, зносостійкістю й хімічною стійкістю. Для стінових матеріалів важливе співвідношення міцності та теплотехнічних характеристик, для плитки — також стійкість поверхневого шару й глазурі до стирання та дії побутових реагентів. Одна й та сама назва «кераміка» не означає однакових експлуатаційних характеристик.

У процесі спікання формується міцний контакт між зернами, але залишкові відкриті пори можуть поглинати воду. Солевмісна вода за капілярного перенесення спричиняє висоли, а цикли зволоження, заморожування й висушування поступово руйнують недостатньо морозостійкий матеріал. Глазур зазвичай являє собою склоподібний шар, що утворюється під час термічної обробки; несумісність коефіцієнтів теплового розширення глазурі й черепка може викликати сітку тріщин або відшарування. Джерело розділу: [1, розд. 4].

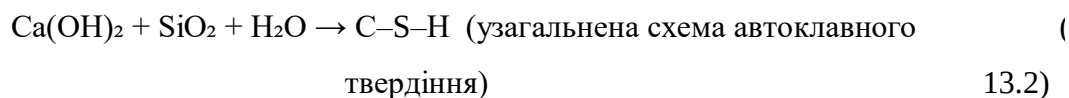
Таблиця 13.1. Матеріал і визначальні хімічні процеси

Матеріал	Основа складу	Ключовий процес
Керамічна цегла	Глинисті мінерали, SiO ₂ , домішки	Дегідроксилювання і спікання
Силікатна цегла	Пісок SiO ₂ , вапняний компонент	Гідротермальне утворення кальцій-силікат-гідратів
Звичайне скло	SiO ₂ , Na ₂ O, CaO та інші оксиди	Плавлення і формування аморфної структури
Склокристалічні вироби	Підібрані склоутворювальні системи	Контрольована кристалізація

5. Силікатна цегла та автоклавне твердіння

Силікатні стінові вироби одержують, зокрема, із суміші кварцового піску й вапняного компонента за підвищеної температури та тиску насиченої водяної пари в автоклаві. Під час гідротермальної обробки Ca(OH)₂ взаємодіє з активною поверхнею кремнезему, утворюючи кальцій-силікат-гідратні фази. Саме нові продукти реакції зв'язують піщані зерна. Автоклавування не слід ототожнювати зі звичайним висиханням або карбонізацією вапна, оскільки за цих умов інший хімічний механізм твердіння.

Структура й властивості виробу залежать від реакційної здатності піску, співвідношення компонентів, тонкості помелу й параметрів автоклавування. Після виготовлення важливі контроль міцності, геометрії, водопоглинання й морозостійкості. Переваги та обмеження силікатної цегли визначаються не лише оксидним складом, а й умовами експлуатації: тривале зволоження чи дія агресивних середовищ потребують спеціального обґрунтування. Джерело розділу: [1, розд. 7.8, 12.2].



6. Скло: хімічний склад, плавлення та кристалізація

Найпоширеніші будівельні силікатні скла утворені просторовою сіткою на основі SiO₂, модифікованою оксидами лужних і лужноземельних металів. Сировинну суміш готують з кварцового піску, соди, вапнякової та інших компонентів. Під час нагрівання відбувається розклад деяких солей, взаємодія оксидів і формування однорідного розплаву. Після контрольованого охолодження формується переважно аморфний матеріал. Зміна складу й термічної обробки впливає на коефіцієнт теплового розширення, хімічну стійкість, оптичні й механічні властивості.

Для скла характерна крихка поведінка при локальних напруженнях і чутливість до дефектів поверхні. Загартування створює сприятливі залишкові напруження, але не усуває необхідності безпечного проєктування скління. Склокристалічні матеріали — ситали — одержують шляхом контрольованої кристалізації скла підібраного складу; кристалічні вclusions змінюють термічні й механічні характеристики. Вибір конкретного матеріалу в

будівництві має враховувати безпеку руйнування, світлопропускання та умови роботи. Джерела розділу: [1, розд. 5]; [2, розд. про сполуки Силіцію].

7. Хімічний склад керамічних мас і технологічні дефекти

У виробництві кераміки оксидний склад сировини допомагає прогнозувати температурний інтервал спікання. SiO_2 формує значну частину мінерального каркаса; Al_2O_3 входить до глинистих і новоутворених фаз; оксиди лужних і лужноземельних металів можуть впливати на утворення рідкої фази та в'язкість розплаву. Ферумвмісні компоненти впливають, зокрема, на забарвлення готової кераміки за відповідних умов випалювання. Проте простий відсотковий склад оксидів не містить відомостей про розмір частинок і вихідну мінеральну форму, тому його доповнюють технологічними випробуваннями.

Під час сушіння вода виходить із капілярів нерівномірно. Поверхня може втрачати її швидше за внутрішні ділянки, що створює градієнт усадки. Тому навіть хімічно придатна глина здатна давати тріщини через занадто інтенсивний режим сушіння. Випалювання дефектної заготовки не обов'язково усуває такі тріщини; частина з них збільшується через температурні напруження. Джерело розділу: [1, розд. 4].

Домішки в сировині також можуть викликати місцеві пошкодження. Великі зерна карбонатів за недостатньої підготовки можуть утворювати під час випалювання активні оксидні включення; їхня подальша взаємодія з вологою іноді супроводжується розширенням. Для запобігання потрібні контроль сировини, подрібнення й правильна температурна обробка. Зовнішню пляму чи вищерблення слід аналізувати разом із фазовим складом і технологічним журналом.

8. Скляна шихта, роль модифікаторів і термічна обробка

У содово-вапняному склі SiO_2 є основним сітکوутворювальним оксидом. Уведення натрієвих компонентів знижує температуру технологічного формування розплаву, а кальцієві та інші оксиди змінюють його хімічну стійкість і механічні характеристики. Баланс шихти необхідно вести за оксидними еквівалентами з урахуванням виділення CO_2 під час розкладу карбонатів. Тому маса вихідної шихти не дорівнює масі сформованого скла навіть за відсутності механічних втрат. Джерело розділу: [1, розд. 5].

Під час охолодження скла відбувається перехід розплаву в аморфний твердий стан. Якщо поверхня й серцевина охолоджуються з різною швидкістю, можуть виникати залишкові напруження. Відпалювання або спеціальна термічна обробка змінюють розподіл таких напружень. Для загартованого скла інженерно значущими є характер руйнування, стан кромки і відповідність виробу його призначенню, а не лише номінальна товщина листа. Слід відрізнити механічне загартування від технології контрольованої кристалізації склокристалічних матеріалів.

Стійкість скла до води й реагентів залежить від його складу та конкретних умов. Лужне середовище здатне атакувати силікатну сітку, а деякі поверхневі забруднення й подряпини

можуть збільшувати чутливість до локальних напружень. Тому скляний матеріал для фасаду, лабораторного приміщення чи технічної споруди добирають за відповідними вимогами. Одного показника світлопропускання недостатньо для оцінювання довговічності.

9. Контроль якості та порівняння трьох матеріалів

Для керамічної цегли визначають геометричні показники, міцність, водопоглинання та морозостійкість за встановленими методиками. Для силікатної цегли важливі міцність і властивості автоклавно утворених кальцій-силікатних фаз. Для скляних виробів додаються оптичні характеристики, термічна стійкість та безпечна поведінка за руйнування. Порівняння має враховувати різне призначення матеріалів: характеристики декоративного скління не можна оцінювати за критеріями несучої цегляної кладки.

У навчальній ситуації студенту пропонують порівняти облицювальну цеглу для фасаду, силікатний блок для сухого внутрішнього приміщення та скло для огорожувальної конструкції. Спочатку він установлює хімічний механізм формування кожного матеріалу, потім визначає критичні середовища й, нарешті, складає перелік необхідних паспортних показників. Для зовнішньої цегли одним із головних ризиків може бути перенесення солей і морозне пошкодження; для внутрішнього силікатного блоку — залежно від умов, вологісний режим; для скла — термічні напруження та безпека руйнування.

Наведені приклади показують, що хімія не замінює будівельних норм, а пояснює причини встановлення різних вимог. За відсутності даних про походження глини, мінеральний склад піску чи тип скла необхідно вказати цю невизначеність. У виробничих умовах остаточне рішення приймають за результатами випробувань матеріалу конкретної партії й відповідності заявленому призначенню. Джерело розділу: [1, розд. 4–5, 12].

10. Матеріальний баланс і характерні технологічні ризики

Для виробництва кераміки, скла та силікатних виробів важливо відділяти масу початкової сировини від маси кінцевого продукту. Під час сушіння видаляється вільна вода, під час нагрівання глини — частина структурно зв'язаної води, під час розкладу карбонатів — CO_2 . У скляній шихті утворюються газоподібні продукти, а під час автоклавного твердіння силікатних виробів вода бере участь у гідротермальних реакціях. Матеріальний баланс кожного процесу складають окремо за фактичним фазовим складом і прийнятими ступенями перетворення.

Таблиця 13.2. Хімічні перетворення в трьох технологіях

Технологія	Ключова реакційна стадія	Основний контроль
Керамічна цегла	Дегідроксилування та спікання	Режим випалювання й пористість
Силікатні вироби	Гідротермальні реакції Ca-Si-H	Автоклавний режим та міцність
Силікатне скло	Плавлення та утворення аморфної сітки	Однорідність розплаву й термічна обробка
Склокристалічний матеріал	Контрольована кристалізація	Фазовий склад і теплові властивості

Уявімо, що виготовлена партія цегли має неоднорідний колір, підвищене водопоглинання й часті тріщини. На першому етапі перевіряють хімічний і мінералогічний склад сировини, потім — однорідність формувальної маси, режим сушіння та температурний профіль випалювання. Нерівномірне забарвлення може бути пов'язане з домішками й атмосферою печі, а тріщини — з усадкою чи термічними напруженнями. Одна візуальна ознака не визначає єдиної причини.

Відмінність кераміки, силікатних автоклавних виробів і скла полягає не просто в назвах сировини, а в механізмах формування кінцевої структури. Тому технологічний контроль і методи випробувань мають бути специфічними для матеріалу. Джерело розділу: [1, розд. 4–5, 12].

11. Хімічна стійкість і навчальний баланс

На довговічність кераміки й скла впливають кислотно-основні властивості середовища, концентрація солей і цикли зволоження. Більшість звичайних силікатних стекол чутлива до тривалої дії концентрованих лужних розчинів; стійкість конкретного скла визначається його складом. Керамічні матеріали з відкритою пористістю поглинають воду й солі, тому захист від висолів починається з контролю джерел зволоження. Для лицьової кладки важливими є також солі будівельних розчинів, а не лише властивості самої цегли.

У навчальному балансі розклад 200 кг чистого CaCO_3 дає теоретично 112 кг CaO та 88 кг CO_2 . Цей розрахунок ілюструє отримання вапняного компонента для силікатних виробів, але не визначає його фактичної реакційної здатності. Для розрахунку складу скла за оксидами потрібно враховувати газоподібні продукти розкладу карбонатів і вологу вихідної шихти. Підсумок теми: хімічний склад формує потенційні властивості силікатних матеріалів, а температурна історія та порова структура визначають значну частину реальної поведінки.

Питання для самоперевірки

1. Якою є роль тетраедрів SiO_4 у силікатних системах?
2. Які стадії проходить глиниста маса під час випалювання?
3. Чому надлишкова пористість змінює морозостійкість кераміки?
4. Який основний механізм автоклавного твердіння силікатної цегли?
5. Чим аморфне скло відрізняється від ситалу?
6. Як оцінюють ризик висолів на цегляній кладці?
7. Які обмеження має теоретичний баланс розкладу карбонатів?

Використані джерела

[1] Новомлинець О. О., Корзаченко М. М., Сергєєв А. І. Будівельне матеріалознавство. Чернігів, 2021. Розд. 3–5, 7, 12.

[2] Хоботова Е. Б. Загальна та неорганічна хімія. Ч. 2. Харків: ХНАДУ, 2026. Розділи про Силіцій та Алюміній.

ТЕМА 14

МЕТАЛИ В БУДІВНИЦТВІ. КОРОЗІЯ АРМАТУРИ ТА МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

1. Корозійна поведінка будівельних металів

Мета лекції. Пов'язати хімічний склад і структуру будівельних металів з електрохімічною корозією, пояснити захисну роль лужного бетону, механізми руйнування пасивної плівки та принципи антикорозійного захисту металевих конструкцій.

План лекції

1. Будівельні метали і сплави; 2. хімічна та електрохімічна корозія; 3. анодні й катодні реакції; 4. пасивність арматури; 5. карбонізація та хлориди; 6. атмосферна і контактна корозія; 7. захист і контроль.

1.1. Будівельні метали та чинники хімічної стійкості

У несучих будівельних конструкціях широко використовують вуглецеві й низьколеговані сталі, а також відповідні конструкційні сплави алюмінію. Хімічний склад, мікроструктура, наявність неметалевих включень і поверхневий стан визначають не лише механічні властивості, а й корозійну поведінку. Сплав одного найменування може мати різні експлуатаційні результати залежно від стану покриття, напружень та агресивності середовища. Для арматури особливо важлива взаємодія металу з поровою рідиною бетону, а для відкритих металоконструкцій — із тонкими плівками атмосферної вологи.

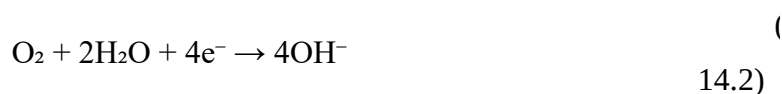
Метал є провідником електронів, а водний розчин солей може переносити заряд йонами. За наявності обох шляхів перенесення заряду на поверхні металу можливі просторово розділені анодні та катодні реакції. Відмінності складу, аерації й доступності води утворюють мікроелектрохімічні ділянки навіть на одній сталевій деталі. Корозійна поведінка залежить від термодинамічної можливості реакцій і від їхньої швидкості, яку визначають поверхневий стан і перенос реагентів. Джерела розділу: [1, розд. 9–10]; [3, розд. 2–6].

2. Анодні й катодні процеси корозії сталі

У типових вологих аерованих умовах анодне розчинення заліза можна записати як $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$. На катодних ділянках у нейтральному або лужному розчині кисень відновлюється з утворенням OH^- . Подальші реакції іонів Fe^{2+} з гідроксид-йонами та киснем приводять до утворення різних гідратованих оксидних і гідроксидних продуктів. Їх умовно об'єднують назвою «іржа», але її склад залежить від вологості, температури, хлоридів і доступу кисню. Іржавий шар часто є пористим і не забезпечує надійної ізоляції основного металу.

Для корозії необхідне одночасне протікання анодної та катодної складових; сповільнення хоча б одного процесу може зменшувати загальну швидкість. Водні електроліти полегшують перенесення йонів, а різниця в доступі кисню створює диференціально-аераційні пари. Тому ділянки в щілинах, під відкладеннями або в застійній воді можуть кородувати

інакше, ніж відкриті поверхні. Оцінювати небезпеку за видимим відсотком іржавої площі без вимірювання втрат перерізу недостатньо. Джерела розділу: [3, розд. 4–6]; [4, розд. 2–5].



3. Лужне середовище бетону та пасивування арматури

Поровий розчин нормально гідратованого цементного каменю зазвичай має високу лужність завдяки гідроксидам і розчинним лужним компонентам. У таких умовах на поверхні сталевих арматур може зберігатися тонка захисна пасивна плівка, яка істотно уповільнює анодне розчинення. Саме тому справний щільний бетон здатний створювати сприятливі умови для тривалої роботи сталі без спеціального суцільного металевих покриття. Водночас цей захист залежить від складу та вологості порового розчину й не є абсолютним.

Карбонізація бетону призводить до зв'язування кальцієвих лужних компонентів і зменшення рН. Якщо фронт карбонізації досягає поверхні арматури, захисні умови можуть порушуватися. Хлорид-йони здатні викликати локальне руйнування пасивного стану навіть за збереження загальної лужності; характер ризику залежить від кількості доступних хлоридів, вологи, кисню й властивостей бетону. Тому в проєктуванні важливі товщина й якість захисного шару, обмеження проникності, контроль тріщин і умов експлуатації. Джерела розділу: [2, розд. 2.6]; [3, розд. 5–6].

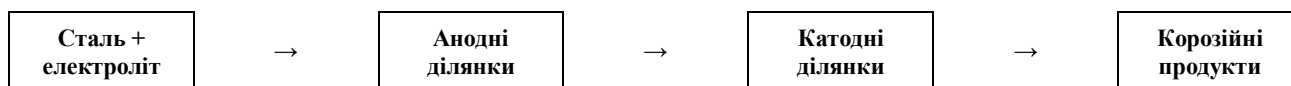


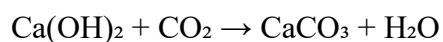
Рис. 14.1. Спрощена схема електрохімічної корозії сталі

4. Карбонізація, хлориди й локальні осередки

Карбонізація є поступовим процесом, за якого CO_2 проникає з повітря в пори бетону, розчиняється у поровій воді й реагує з лужними компонентами. Швидкість проникнення залежить від водного режиму: за майже сухого бетону бракує води для реакції, а за повністю водонасиченого — уповільнюється газова дифузія. Тому максимальна швидкість не обов'язково відповідає найбільшій вологості. Глибину карбонізації визначають за встановленими методиками; забарвлення індикатора дає лише орієнтовну межу зміни лужності, а не пряме вимірювання корозійних втрат сталі.

Хлориди можуть надходити з протиожеледних реагентів, морського аерозолі, забруднених складників і деяких технологічних джерел. У поровому розчині частина хлоридів є зв'язаною, частина — вільною, тому масова частка загальних хлоридів сама по собі не описує повністю агресивність середовища. За локального порушення пасивного стану можливе пітингове ураження, небезпечне через значну втрату перерізу на малій площі. Діагностика

потребує встановлення джерела солей, вологості, електричного стану й фактичного стану арматури. Джерела розділу: [2, розд. 2.6, 3]; [3, розд. 5–9].



(14.3)

5. Корозія відкритих сталевих конструкцій

Атмосферна корозія розвивається за наявності плівки вологи, яка містить розчинений кисень і можливі солі. У міському та промисловому середовищі на її перебіг впливають забрудники, чергування зволоження й висихання, температура та конструктивні особливості вузлів. Застій води в горизонтальних кишнях, під накладками та у щілинах часто підвищує тривалість зволоження. Навіть правильно обране лакофарбове покриття може передчасно відмовити, якщо конструкція створює постійні вологі зони й ускладнює доступ для огляду.

Контакт різнорідних металів у спільному електроліті може формувати гальванічну пару. Який метал стане анодом, визначають не за шкільним рядом активності без урахування середовища, а за фактичними електродними характеристиками системи. Невигідне співвідношення площ катодної та анодної ділянок може посилювати локальну корозію менш благородного металу. Конструктивне розділення металів діелектричними прокладками, відведення води та сумісні захисні покриття зменшують ризик. Джерело розділу: [3, розд. 6, 8, 11].

Таблиця 14.1. Порівняння основних корозійних впливів

Умова	Механізм або фактор	Заходи контролю
Карбонізація бетону	Зниження лужності біля арматури	Перевірка глибини, захисного шару й стану сталі
Хлоридне середовище	Можлива локальна депасивація	Аналіз хлоридів, вологи і потенціалів
Атмосферне зволоження	Електролітна плівка на сталі	Огляд покриття, дренаж, чистота поверхні
Контакт металів	Гальванічна пара в електроліті	Розділення металів, коректний підбір покриттів

6. Захист, ремонт і контроль

Захист арматури починається з якісного бетону: контрольоване В/Ц, ущільнення, догляд, достатній захисний шар і конструктивне запобігання тріщинам обмежують надходження вологи, CO₂ та солей. Якщо арматура вже кородує, вибір ремонту залежить від глибини пошкодження, концентрації хлоридів, ступеня карбонізації й реальних умов роботи. Локальне відновлення поверхні без усунення джерела агресивного впливу може не припинити процес. У деяких відповідних випадках застосовують електрохімічні методи захисту, але рішення потребує спеціалізованого обстеження.

Для відкритих металевих конструкцій поширені системи ґрунтування, лакофарбових покриттів, цинкування й конструктивні заходи з відведення води. Цинк може діяти як бар'єр і як жертвний анод за відповідних умов, тоді як звичайне органічне покриття переважно ізолює

метал від середовища. Перед нанесенням покриття контролюють видалення іржі, солей, пилу, жиру та вологість поверхні. Параметри товщини й сумісність шарів визначають за системою покриття та умовами експлуатації. Джерела розділу: [2, розд. 4–6]; [3, розд. 11–12].

7. Діагностика корозії: потенціали, опір і стан арматури

Для оцінки ризику корозії арматури використовують комплекс взаємодоповнювальних методів. Вимірювання електродного потенціалу може вказувати на ймовірність активного стану в конкретних умовах, але не є прямим вимірюванням швидкості втрати металу. Питомий електричний опір бетону допомагає оцінювати умови йонного перенесення в поровій системі; його значення залежить від вологості, температури, складу бетону та концентрації солей. Пряме встановлення втрати перерізу арматури може потребувати розкриття контрольної ділянки.

Для коректної інтерпретації потенціалів важливо знати тип електрода порівняння, стан поверхні й вологість. Занадто сухий бетон може утруднювати вимірювання через великий опір, а наявність активних гальванічних пар у складному вузлі змінювати результати. Тому за однією картою потенціалів не слід беззастережно встановлювати точну глибину корозії або залишкову несучу здатність елемента. Джерела розділу: [2, розд. 3]; [3, розд. 9, 13].

Хімічний аналіз порошкових проб бетону дає змогу визначати вміст хлоридів за глибиною та, за відповідними методиками, інші індикатори середовища. Якщо хлориди зосереджені переважно біля поверхні, це може вказувати на зовнішнє надходження, але інтерпретація потребує відомостей про первинний склад матеріалів. Для карбонізації важливо знати її глибину відносно фактичного захисного шару. Тільки поєднання результатів створює обґрунтовану картину.

8. Захисні покриття, цинк і конструктивна профілактика

Атмосферний захист сталі зазвичай ґрунтується на зменшенні доступу води та кисню до металу. Лакофарбові шари формують бар'єр, але їхня суцільність і адгезія можуть порушуватися при механічних пошкодженнях і старінні. Гаряче цинкування або інші цинкові системи здатні забезпечувати додатковий електрохімічний захист сталевій основі за відповідного контакту й середовища. Однак цинковий шар також має власну швидкість корозії; його ресурс залежить від товщини та експозиції.

Для довговічності захисної системи важливо правильно підготувати поверхню. Залишки водорозчинних солей під органічним покриттям можуть спричиняти утворення осмотичних здуттів; нерівномірна товщина створює ділянки раннього руйнування. У місцях зварювання і гострих кромки можливі особливі труднощі з отриманням достатньої товщини сухої плівки. Тому технологія включає очищення, оцінку шорсткості, контроль кліматичних умов нанесення та приймальні вимірювання. Джерела розділу: [3, розд. 11–12]; [1, розд. 9].

Конструктивні рішення часто зменшують корозійний ризик без додавання нових реагентів. Дренажні отвори, захист горизонтальних поверхонь від застою води, герметизація

небажаних щілин та забезпечення доступу до огляду скорочують тривалість зволоження. Якщо доступ для ремонту обмежений, це необхідно враховувати під час вибору системи покриття. Сам хімічний склад ґрунтовки не компенсує неправильно спроектованого вузла.

9. Приклад аналізу залізобетонного балкона

На умовному балконі поблизу краю плити виявлено тріщину та відшарування захисного шару; на відкритій арматурі є продукти корозії. Недостатньо відразу зробити висновок про конкретне джерело агресії. Потрібно встановити наявність протікань, стан гідроізоляції, фактичну товщину бетонного покриття арматури, глибину карбонізації та, за потреби, вміст хлоридів. Тріщина може бути як причиною прискореного надходження води, так і наслідком розширення корозійних продуктів. Джерела розділу: [2, розд. 2–4].

Після встановлення механізму пошкодження визначають обсяг видалення неміцного бетону, стан і допустиму втрату перерізу арматури та необхідність конструктивного підсилення. Ремонтний матеріал має забезпечити потрібну адгезію й сумісність з основою; відновлена гідроізоляція повинна усунути шлях постійного надходження води. Якщо конструкція працює в хлоридному середовищі, локальне відновлення тільки видимого дефекту може виявитися недостатнім без аналізу суміжних ділянок.

Контроль після ремонту включає перевірку підготовки основи, якості укладання ремонтного матеріалу, стану захисного шару та роботи водовідведення. Потрібно передбачити періодичні огляди й критерії повторного втручання. Цей приклад показує, що електрохімічний механізм корозії й суто будівельні чинники — тріщини, водний режим, геометрія — утворюють одну систему, яку не можна аналізувати окремими непов'язаними рішеннями.

10. Системний вибір антикорозійного захисту

Для металевої балки, арматури в бетоні та підземного сталевих трубопроводу застосовують різні підходи до захисту. Відкрита балка доступна для очищення й періодичного відновлення покриття, арматура захищена лужним середовищем і бетонним шаром, а підземний трубопровід може працювати у тривалому контакті з ґрунтовим електролітом. Тому критерії вибору системи визначаються фізико-хімічними умовами та можливістю технічного обслуговування, а не лише властивостями металу.

Таблиця 14.2. Типові системи захисту сталі

Об'єкт	Первинний механізм захисту	Що контролюють
Арматура в бетоні	Пасивний стан у лужному поровому розчині	Захисний шар, проникність, хлориди
Відкрита сталева конструкція	Бар'єрне або комбіноване покриття	Очищення, товщина, суцільність
Оцинкована деталь	Бар'єр і протекторна дія цинку	Товщина, цілісність, середовище
Підземний трубопровід	Ізоляція та за потреби електрохімічний захист	Стан ізоляції, електричні параметри

У навчальному розрахунку для металевої поверхні площею 80 м² за питомої витрати ґрунтовки 0,20 кг/м² теоретична потреба становить 16 кг на один шар. Однак кількість

матеріалу не відображає його захисної ефективності без даних про товщину сухої плівки, підготовку поверхні й умови твердіння. За наявності солей під покриттям навіть достатня номінальна товщина не гарантує довговічності.

Для залізобетону аналогічно важлива не сама лише марка бетону, а система «якість суміші — догляд — захисний шар — тріщиностійкість». Джерела розділу: [2, розд. 2.6, 5]; [3, розд. 11–13].

11. Кількісний показник швидкості корозії

У навчальному випробуванні сталевий зразок площею 0,020 м² після очищення від продуктів корозії втратив 4,0 г за 200 год. Питомий масовий показник втрати дорівнює $4,0 / (0,020 \cdot 200) = 1,0$ г/(м²·год). Для порівняння двох зразків потрібно забезпечити однакові умови очищення, площі, тривалості експозиції та стану поверхонь. Сам показник у грамах не показує глибину локального пітингу, а перерахунок у середню втрату товщини потребує густини матеріалу.

Результати прискореного випробування не можна безпосередньо використовувати як достовірний прогноз довговічності конструкції в реальній атмосфері. В експлуатації змінюються температура, вологість, склад електроліту й механічне навантаження. Для залізобетону додатково враховують електричний опір бетону, доступ кисню та вплив тріщин. Підсумок теми: ефективне запобігання корозії вимагає одночасного розуміння електрохімії та контролю транспортних властивостей будівельних матеріалів.

$$K_m = \Delta m / (S \cdot t) \quad (14.4)$$

Питання для самоперевірки

1. Назвіть анодну й катодну реакції корозії сталі у вологому аерованому середовищі.
2. Чому нормальний цементний камінь часто пасивує арматуру?
3. Які відмінності між карбонізаційним і хлоридним механізмами корозії?
4. Чому застій вологи небезпечний для сталевих конструкцій?
5. Як контакт різновидних металів впливає на корозію?
6. Чим відрізняється бар'єрна і протекторна дія цинку?
7. Чому середня масова втрата не описує глибину пітингу?

Використані джерела

[1] Новомлинець О. О., Корзаченко М. М., Сергеев А. І. Будівельне матеріалознавство. Чернігів, 2021. Розд. 9–10.

[2] Пшінько О. М., Савицький М. В., Зінкевич А. М. Відновлення експлуатаційної придатності бетонних, залізобетонних та кам'яних конструкцій. Дніпро, 2018. Розд. 2.6, 4–6.

[3] Білоусова Н. А., Погребова І. С., Лінючев О. Г. Корозія та захист від корозії. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. Розд. 2–12.

[4] Євсєєва М. В., Ранський А. П., Гордієнко О. А. Електрохімічні процеси: теорія та практикум. Вінниця: ВНТУ, 2017.

ТЕМА 15

ХІМІЧНЕ РУЙНУВАННЯ БЕТОНУ І КАМ'ЯНИХ МАТЕРІАЛІВ В АГРЕСИВНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

1. Основні механізми руйнування мінеральних матеріалів

Мета лекції. Пояснити основні механізми хімічного руйнування цементного каменю, бетону й природного каменю у водних, газових і біогенних агресивних середовищах; навчитися розрізняти вилуговування, кислотне та сульфатне ураження й визначати потребу в обстеженні.

План лекції

1. Агресивне середовище; 2. вилуговування; 3. кислотна й вуглекислотна дія; 4. сульфатна агресія; 5. реакції заповнювача; 6. газова й біогенна корозія; 7. діагностика та первинний захист.

1.1. Види агресивних впливів і транспортні властивості

Довговічність цементного каменю й бетону залежить від взаємодії їхнього хімічного складу з речовинами, що надходять із зовнішнього середовища. Джерелами агресивного впливу можуть бути ґрунтові й виробничі води, кислотні стоки, морська вода, сульфатні ґрунти, газові забрудники й продукти діяльності мікроорганізмів. Сам факт наявності певного йона у воді ще не визначає ступінь небезпеки: значення мають концентрація, рН, швидкість поновлення розчину, температура, вологість і проникність бетону. Проектні рішення мають спиратися на аналіз конкретного середовища.

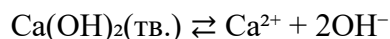
Проникнення агресивних речовин відбувається через капілярний і тріщинний простір. Щільний бетон із контрольованим водоцементним відношенням і належним доглядом зазвичай перешкоджає швидкому транспорту, але відкриті тріщини можуть створювати локальні шляхи надходження розчину незалежно від середньої пористості. Хімічні реакції в порах можуть тимчасово ущільнювати структуру за рахунок осадів або, навпаки, розширювати й руйнувати її. Необхідно враховувати взаємний вплив транспорту реагентів і змін структури. Джерела розділу: [1, розд. 8.7]; [2, розд. 2].

2. Вилуговування кальцієвих сполук

У воді з низькою концентрацією кальцію та за умов постійного відновлення розчину з цементного каменю можуть переходити розчинні кальцієві компоненти. Насамперед це стосується $\text{Ca}(\text{OH})_2$, а за тривалої дії змінюються й кальцій-силікат-гідратні фази. Унаслідок цього зростає пористість, послаблюються зв'язки між частинками й може знижуватися міцність. Процес часто пов'язують із так званою корозією бетону першого виду — вимиванням розчинних компонентів за певних умов. Особливо небезпечне поєднання м'якої проточної води та високої проникності матеріалу.

Іноді на поверхні утворюються білі кальцитові відкладення, коли винесений кальцій взаємодіє з CO_2 повітря. Такі сліди вказують на перенесення речовини, але їх наявність не дає автоматичної оцінки глибини руйнування. Якщо вода проходить крізь тріщину й активно

вимиває сполуки, локальний дефект може розвиватися навіть тоді, коли більша частина поверхні виглядає неушкодженою. Для оцінки потрібні дані про джерело води, її склад, фільтрацію, стан швів і тріщин. Джерела розділу: [2, розд. 2.3]; [1, розд. 8.7].

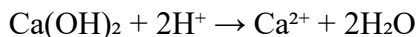


(15.1)

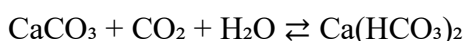
3. Кислотна та вуглекислотна агресія

Кислоти реагують із кальцій гідроксидом і карбонатними компонентами, а також можуть руйнувати кальцієві силікатні гідрати. Для деяких кислот утворюються добре розчинні солі, які вимиваються із матеріалу; для інших — малорозчинні продукти, що інколи тимчасово накопичуються на поверхні. Універсального правила стійкості до всіх кислот не існує, оскільки продукти реакції, рН і швидкість поновлення розчину різняться. Звичайний портландцементний бетон не розглядають як природно кислотостійкий без спеціального підтвердження його придатності.

Агресивна вуглекислота у воді може розчиняти CaCO_3 з утворенням гідрокарбонатних форм. У природних карбонатних каменях це пов'язано з повільним хімічним вивітрюванням; у цементному камені може посилювати втрату кальцієвих компонентів. Вуглекислотний вплив води не тотожний звичайній атмосферній карбонізації, адже в одному випадку можливе постійне вимивання, а в іншому — утворення твердого карбонату в порах. Для правильної діагностики слід врахувати водний режим. Джерела розділу: [2, розд. 2.3]; [1, розд. 3, 8.7].



(15.2)



(15.3)

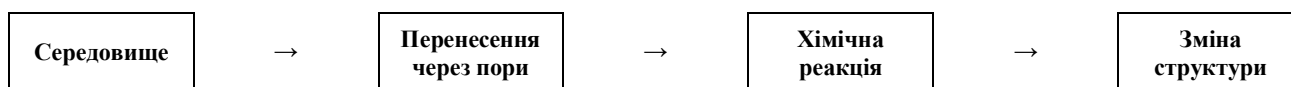


Рис. 15.1. Взаємозв'язок транспорту реагентів і хімічного руйнування

4. Сульфатна агресія та утворення розширювальних фаз

Сульфат-йони з ґрунтових вод або технологічних розчинів можуть взаємодіяти з компонентами цементного каменю. За сприятливих умов формуються додаткові кальцій-сульфатні та кальцій-алюмосульфатні продукти, зокрема гіпс і еtringіт. Якщо такі реакції відбуваються у вже сформованому обмеженому поровому просторі, вони можуть створювати розширювальні напруження, тріщини та відшарування. Проте перебіг залежить від складу цементу, концентрації йонів, температури, вологості й доступності реагентів; не кожна наявність сульфатів спричиняє однакову форму руйнування.

Вибір цементу й добавок для сульфатного середовища повинен враховувати встановлений клас впливу та конкретні характеристики води й ґрунту. Зменшення проникності

бетону нерідко має вирішальне значення, оскільки обмежує доставляння сульфатів до реакційних фаз. Для ремонту не можна просто замінити пошкоджений шар звичайним розчином, не перевіривши збереження агресивного середовища: інакше новий матеріал може зазнавати тих самих процесів. Джерела розділу: [1, розд. 7.6, 8.7]; [2, розд. 2.3, 5].

Таблиця 15.1. Порівняння поширених хімічних впливів

Вплив	Головний механізм	Можливі ознаки
М'яка проточна вода	Вимивання кальцієвих компонентів	Зростання пористості, кальцитові відкладення
Кислий розчин	Нейтралізація й розчинення цементного каменю	Розм'якшення і втрата поверхневого шару
Сульфатне середовище	Утворення нових сульфатних фаз	Розширення, тріщини, відшарування
Біогенний вплив	Утворення агресивних продуктів життєдіяльності	Поверхнєве руйнування в особливих умовах

5. Лужна реакція з реакційноздатним кремнеземом заповнювача

Окремі форми реакційноздатного кремнезему в заповнювачі можуть взаємодіяти з лугами порового розчину цементного каменю. За наявності достатньої вологи утворюється продукт, здатний набухати й створювати внутрішні напруження. Тому хімічно схожі за основним складом кварцові заповнювачі можуть по-різному поводитися залежно від конкретної мінеральної форми кремнезему. Наявність звичайного кварцу ще не доводить небезпеку; потрібні спеціальні випробування реакційної здатності заповнювача й бетонної суміші.

Пошкодження від лужно-кремнеземної реакції часто пов'язане із системою тріщин та внутрішніми продуктами, але подібні зовнішні ознаки можуть мати інші причини. Для достовірного висновку аналізують склад заповнювача, концентрацію лугів, водний режим і мікроструктуру ушкодженого бетону. Первинна профілактика передбачає вибір придатних заповнювачів, контроль лужного балансу й обґрунтоване застосування відповідних мінеральних добавок. Джерела розділу: [1, розд. 8]; [2, розд. 2].

6. Газова і біогенна корозія. Руйнування природного каменю

У промислових і міських умовах на матеріали можуть діяти газоподібні компоненти, які після розчинення в тонкій плівці води утворюють агресивне середовище. Для природного вапняку й деяких розчинів небезпечне кислотне розчинення карбонатів; на фасадах воно може поєднуватися з перенесенням солей і зміною забарвлення. Для цементного каменю важлива карбонізація, а за специфічних промислових умов — інші газові впливи. Оцінювання слід вести з урахуванням концентрацій, тривалості зволоження й особливостей поверхні.

У каналізаційних та окремих виробничих спорудах мікроорганізми за певних умов беруть участь у перетворенні сполук Сульфуру; утворення кислотних продуктів може викликати локальне руйнування цементного каменю. Наявність бактерій як така не доводить біогенної корозії: потрібні дані про газову фазу, вологість, рН та продукти реакції. Для

природних каменів додатковим чинником може бути кристалізація солей у порах, що є фізико-хімічним, а не лише механічним процесом. Джерело розділу: [2, розд. 2.4–2.5].

7. Роль пористості, тріщин і швидкості протікання води

Для багатьох процесів хімічної корозії бетону першочерговим є надходження агресивних речовин до реакційної поверхні. В одному випадку швидкість визначається повільною дифузією йонів через відносно щільний камінь, в іншому — потоком води через тріщину. У другому випадку навіть невелика площа дефекту може забезпечувати постійне поновлення агресивного розчину й швидке вилуговування кальцієвих компонентів. Тому середній показник водопоглинання не описує всіх шляхів перенесення, а під час обстеження слід окремо виявляти наскрізні та активні тріщини.

Хімічні реакції іноді змінюють пористість у протилежних напрямках. Утворення малорозчинного осаду може частково блокувати капіляри, сповільнюючи подальший транспорт, але розчинення цементного каменю створює нові пори та підвищує проникність. За сульфатної агресії нові продукти можуть заповнювати простір, а потім спричиняти розширювальні напруження і тріщини, які ще більше прискорюють надходження розчину. Так формується зворотний зв'язок між хімією та структурою. Джерела розділу: [1, розд. 8.7]; [2, розд. 2].

Для навчальної оцінки важливо розрізняти концентрацію реагенту й загальну кількість, що контактує з матеріалом. Невеликий об'єм концентрованого розчину після реакції може швидко втратити агресивність; натомість постійне надходження менш концентрованої води здатне з часом перенести значно більшу масу реагентів. Це пояснює, чому умови фільтрації обов'язково враховують під час оцінки ґрунтових та технологічних вод.

8. Характерні ознаки та обмеження зовнішньої діагностики

Порошіння й розм'якшення поверхні можуть свідчити про втрату зв'язувальної здатності цементного каменю, але не вказують однозначно на кислотне ураження. Білі кристалічні відкладення можуть бути результатом винесення кальцію, висолоутворення або нанесення зовнішніх солей. Сітка тріщин може виникати через сульфатні реакції, лужно-кремнеземну реакцію, усадку, температурні деформації чи механічні навантаження. Встановлення причини тільки за фотографією створює ризик неправильного ремонту.

Під час діагностики зіставляють карту пошкоджень із шляхами руху води, умовами експлуатації й хімічним аналізом середовища. За потреби відбирають матеріал із зовнішньої та неушкодженої внутрішньої зони, порівнюючи фазовий склад і структуру. Для оцінювання корозії арматури додатково важливі вимірювання захисного шару, карбонізації та хлоридів. Джерела розділу: [2, розд. 2–3]; [1, розд. 8.7].

Якщо бетон є частиною відповідальної несучої конструкції, хімічні пошкодження необхідно розглядати разом із фактичною міцністю та втратою перерізу. Локальна поверхнева ерозія може мати інші конструктивні наслідки, ніж глибокі тріщини чи корозія попередньо

напруженої арматури. Навчальний хімічний аналіз не замінює інженерного обстеження, але визначає, які проби і випробування будуть інформативними.

9. Профілактика й обґрунтування ремонту

Універсального складу бетону, стійкого до будь-яких агресивних середовищ, не існує. Для сульфатного ґрунту важливі вибір відповідного цементу й обмеження проникності; для кислотної технологічної рідини може бути потрібна спеціальна захисна система; для дії м'якої проточної води — конструктивне обмеження фільтрації та відповідні матеріали. Починати слід з аналізу середовища і класу впливу, а не зі списку наявних ремонтних сумішей. Джерела розділу: [1, розд. 7–8]; [2, розд. 5–6].

Після видалення пошкодженого шару необхідно оцінити, чи залишаються агресивні солі у глибині матеріалу. Якщо вони продовжують надходити з ґрунту, поверхнєве покриття без водовідведення може спричинити нове накопичення вологи під ремонтним шаром. Ремонтний матеріал підбирають за хімічною стійкістю, адгезією, паропроникністю та деформаційною сумісністю. Контроль виконують не тільки одразу після завершення робіт, а й під час експлуатації.

У навчальному кейсі маємо бетонний резервуар із локальним руйнуванням поверхні та воду з підвищеним умістом сульфатів. Перш ніж обирати покриття, слід підтвердити склад води, дізнатися про тривалість її контакту з поверхнею, установити стан гідроізоляції та відібрати зразки продуктів руйнування. Якщо виявлено інший провідний чинник, наприклад кислотний стік, система захисту може потребувати принципово іншого рішення. Такий підхід поєднує хімічну діагностику й технічну відповідальність.

10. Порівняльний аналіз умовної підземної споруди

Припустимо, бетонна стінка підземної споруди контактує з водою, яка містить сульфати, а в окремій зоні спостерігають активне протікання через тріщину. Ризик хімічного ураження залежить від концентрації іонів, складу цементного каменю, тривалості контакту й швидкості потоку. На ділянці активної фільтрації можливе інтенсивніше перенесення агресивних речовин, ніж на поверхні того самого бетону без тріщин. Отже, аналіз починають із карти зволоження та відбору репрезентативних проб води.

Таблиця 15.2. Приклади механізмів ураження цементного каменю

Джерело впливу	Провідний процес	Потрібні дані
М'яка проточна вода	Вимивання кальцієвих фаз	Склад води та швидкість фільтрації
Кислий стік	Нейтралізація й розчинення	рН, вид кислот, тривалість контакту
Сульфатна вода	Вторинні сульфатні реакції	Уміст SO_4^{2-} і склад цементу
Хлоридна вода	Ризик корозії арматури	Уміст Cl^- , стан сталі й захисного шару

Якщо на стінці є білі відкладення, потрібно встановити їхній склад, а не автоматично ототожнювати їх з еtringітом або гіпсом. Відкладення кальциту можуть бути наслідком

винесення кальцію крізь тріщину; сульфатні продукти можуть виникати за інших умов. Виявлення конкретного мінералу допомагає звужити коло механізмів, але остаточний висновок потребує зіставлення всіх вихідних даних.

Ремонт має спочатку усунути або контролювано обмежити надходження агресивного середовища, після чого добирають матеріал з відповідними характеристиками стійкості та сумісності. Джерела розділу: [2, розд. 2–6].

11. Послідовність діагностики й навчальний приклад

Під час обстеження спочатку встановлюють тип матеріалу, геометрію та характер ушкодження, джерела води й можливі шляхи надходження реагентів. Далі аналізують проби води або ґрунту, визначають рН, необхідні йонні компоненти та їхню концентрацію, а за потреби досліджують зразки бетону й продуктів корозії. Результати співвідносять зі структурними дефектами, бо однакові білі відкладення можуть виникати за різних механізмів. До вибору ремонту слід з'ясувати, чи припинено надходження агресивного середовища.

Для навчальної задачі взято 10 кг умовно чистого $\text{Ca}(\text{OH})_2$ у поверхневому шарі. За рівнянням нейтралізації двома молями H^+ на один моль $\text{Ca}(\text{OH})_2$ стехіометрична кількість йонів Гідрогену становить $10\,000/74 \cdot 2 \approx 270$ моль. Це лише ілюстрація співвідношень: у справжньому бетоні частина кальцію перебуває в інших фазах, а швидкість доступу кислоти обмежена транспортом через пори. Підсумок теми: хімічний механізм і ступінь агресивності визначають для конкретної системи «матеріал — середовище — час».

Питання для самоперевірки

1. Які три складові визначають небезпеку агресивного середовища?
2. У чому полягає вилуговування кальцієвих сполук?
3. Чим вуглекислотна агресія води відрізняється від атмосферної карбонізації?
4. За яких умов сульфатні реакції можуть пошкоджувати цементний камінь?
5. Чому реакційну здатність заповнювача треба перевіряти випробуваннями?
6. Які дані підтверджують можливість біогенної корозії?
7. Чому діагностика має передувати підбору ремонтного матеріалу?

Використані джерела

[1] Новомлинець О. О., Корзаченко М. М., Сергєєв А. І. Будівельне матеріалознавство. Чернігів, 2021. Розд. 7.6, 8.7.

[2] Пшінько О. М., Савицький М. В., Зінкевич А. М. Відновлення експлуатаційної придатності бетонних, залізобетонних та кам'яних конструкцій. Дніпро, 2018. Розд. 2, 5–6.

ТЕМА 16

ХІМІЯ ВОДИ В БУДІВНИЦТВІ: СОЛІ, ЖОРСТКІСТЬ, АГРЕСИВНІСТЬ ВОДИ ТА ВИСОЛОУТВОРЕННЯ

1. Хімічний склад води та його технологічне значення

Мета лекції. Пояснити вплив хімічного складу води на будівельні суміші та довговічність матеріалів, розглянути жорсткість, кислотність, агресивну вуглекислоту, перенесення солей і механізми появи висолів.

План лекції

1. Природні та технологічні води; 2. йонний склад і рН; 3. тимчасова й постійна жорсткість; 4. агресивність води; 5. солеперенесення й висоли; 6. контроль води; 7. розрахунок жорсткості та профілактика.

1.1. Хімічний склад води та її роль у будівництві

Вода є реагентом гідратації в'язучих, дисперсійним середовищем свіжих сумішей і головним переносником багатьох агресивних речовин у пористих матеріалах. Природні води містять розчинені солі кальцію, магнію, натрію, калію та аніони гідрогенкарбонату, сульфату, хлориду й інші компоненти. Їхня концентрація залежить від геологічної будови території, контакту з породами та техногенного впливу. Висока прозорість не означає хімічної чистоти: навіть візуально безбарвна вода може містити солі й розчинені гази, які впливають на бетон, метал або камінь.

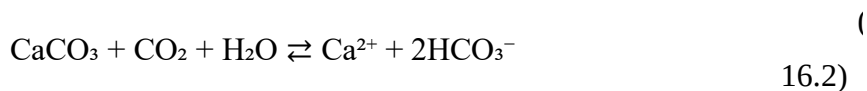
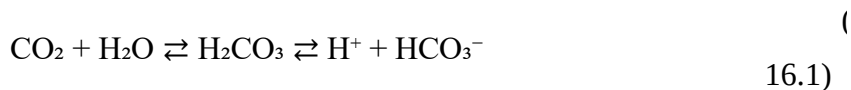
У будівництві розрізняють воду замішування, експлуатаційну воду, що контактує з конструкціями, і воду для миття та технологічних операцій. Вимоги до них різні. Неприпустимо автоматично переносити характеристики питної води на агресивність підземного потоку чи, навпаки, вважати кожен мінералізовану воду непридатною для всіх технологічних потреб. Потрібні відповідні критерії: рН, електропровідність, уміст окремих йонів, органічних домішок, а для залізобетону — особливо хлоридів. Джерела розділу: [1, розд. 8]; [2, розд. 2].

2. Кислотність, лужність і вуглекислотна рівновага

Водневий показник рН характеризує активність йонів Гідрогену, а лужність — здатність води нейтралізувати кислоту, головним чином завдяки гідрогенкарбонатним, карбонатним та гідроксидним формам. Ці поняття пов'язані, але не тотожні. Дві води з однаковим рН можуть мати різну буферну ємність і по-різному реагувати на додавання кислот чи лугів. У природних водах важливу роль відіграє система $\text{CO}_2 \text{ — H}_2\text{CO}_3 \text{ — HCO}_3^- \text{ — CO}_3^{2-}$, рівновага якої залежить від рН, температури й газообміну.

Вода, здатна додатково розчиняти карбонат кальцію, за певних умов є агресивною відносно карбонатного каменю й кальцієвмісного цементного каменю. Її небезпеку визначають не тільки загальною кількістю CO_2 , а й співвідношенням розчинених карбонатних форм і можливістю постійного поновлення розчину. За виходу води на поверхню, зміни тиску й

втрата CO_2 кальцит, навпаки, може випадати в осад. Цим пояснюється можливість одночасного розчинення в одній частині системи й утворення відкладень в іншій. Джерела розділу: [2, розд. 2.3]; [3, розд. про розчини].



3. Жорсткість води та її різновиди

Жорсткість води пов'язана переважно з умістом розчинених йонів Ca^{2+} і Mg^{2+} . Карбонатну, або тимчасову, складову традиційно пов'язують із гідрогенкарбонатами; некарбонатна, або постійна, включає внесок інших солей цих металів. Під час нагрівання гідрогенкарбонат кальцію може розкладатися з утворенням малорозчинного CaCO_3 та CO_2 . Тому за певних умов виникає накип на теплообмінних поверхнях. Магнієві сполуки можуть утворювати інші продукти залежно від температури та рН, тож просте рівняння для кальцію не описує всю хімію жорсткості.

Жорсткість часто виражають через молярну концентрацію еквівалентів або за іншими нормативно визначеними одиницями. Під час обчислення слід уважно враховувати двозарядність йонів кальцію та магнію. Висока жорсткість не тотожна агресивності води щодо бетону: жорстка вода може бути близькою до рівноваги з CaCO_3 , тоді як м'яка проточна вода здатна вимивати кальцієві сполуки. Для оцінки дії на конструкцію потрібен повний хімічний аналіз. Джерела розділу: [3, розд. про розчини й електроліти]; [2, розд. 2.3].

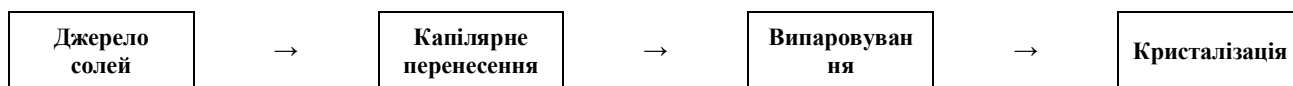
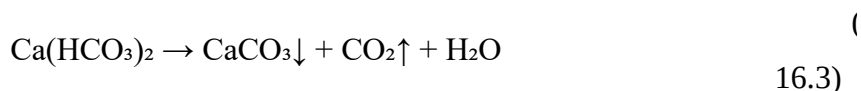


Рис. 16.1. Умови виникнення висолів у пористому матеріалі

4. Сульфати, хлориди та інші розчинені компоненти

Сульфат-йони можуть надходити з природних ґрунтів, промислових стоків і забруднених матеріалів. За відповідних умов вони беруть участь у реакціях з алюмінатними й кальцієвими фазами цементного каменю, що іноді супроводжуються утворенням розширювальних продуктів. Хлориди особливо важливі для залізобетону, оскільки можуть порушувати пасивний стан сталі й сприяти локальній корозії. Отже, однаковий показник загальної мінералізації не означає однакової небезпеки: різні йони викликають різні механізми пошкодження.

За оцінювання технологічної води потрібно також урахувати домішки, що впливають на кінетику цементної гідратації та на стабільність хімічних добавок. Наявність органічних речовин або технологічних поверхнево-активних компонентів може змінювати час

схоплювання, повітровміст і реологію суміші. Тому лабораторне випробування води або порівняльне випробування розчину з контрольним зразком у низці випадків інформативніше за поодинокі вимірювання електропровідності. Джерела розділу: [1, розд. 8]; [2, розд. 2.3, 2.6].

Таблиця 16.1. Хімічні компоненти води та значення для будівництва

Компонент	Можливий вплив	Метод контролю
Ca^{2+} , Mg^{2+}	Жорсткість; утворення окремих осадів	Титриметричне або інструментальне визначення
HCO_3^- , CO_2	Карбонатна рівновага й агресивність	pH, лужність, спеціальні показники
SO_4^{2-}	Можлива сульфатна дія на цементний камінь	Визначення сульфатів
Cl^-	Ризик локальної корозії арматури	Визначення хлоридів
Розчинні солі загалом	Кристалізація й висолоутворення	Електропровідність та йонний аналіз

5. Висоли: міграція, випаровування й кристалізація

Висоли — це видимі соляні відкладення на поверхні цегли, бетону, штукатурки та природного каменю. Для їх утворення потрібні джерело розчинних солей, вода, яка переносить йони, і зона випаровування або зміни умов розчинності. Солі можуть надходити із сировини, кладочного розчину, ґрунтової вологи, протижеледних реагентів або атмосферних забрудників. Білі плями не завжди мають однаковий склад: це можуть бути карбонати, сульфати, хлориди або їхні суміші, тому спосіб очищення обирають після визначення природи відкладень.

Якщо кристалізація відбувається всередині пор, її механічний ефект може бути значнішим, ніж у разі появи пухкого нальоту на поверхні. Цикли розчинення й перекристалізації створюють напруження, що викликають лущення та відшаровування. Механічне видалення видимих солей без усунення надходження води й розчинених компонентів може давати лише короточасний косметичний результат. Тому профілактика починається з гідроізоляції, правильного водовідведення, сумісності матеріалів і контролю солевмісних складників. Джерела розділу: [1, розд. 3–4, 8]; [2, розд. 2, 5].

6. Методи контролю та інтерпретація результатів

Для первинної оцінки води вимірюють pH, електропровідність і, за завданням, загальну жорсткість, лужність та концентрації окремих йонів. Методи відбору і зберігання проб мають відповідати вимогам дослідження, адже контакт із повітрям може змінювати вміст CO_2 і pH. Результати бажано наводити в узгоджених одиницях: мг/л для масових концентрацій, ммоль/л для молярних тощо. Необхідно чітко розрізняти об'єм проби, концентрацію реагенту та загальну кількість визначуваної речовини.

Для бетону й каменю аналіз води поєднують з оцінкою проникності, пористості, тріщин і характеру зволоження. Навіть вода з помірною концентрацією солей може поступово спричиняти помітні відкладення за багаторазового випаровування; навпаки, короточасний

контакт із концентрованим розчином без проникнення не завжди викликає глибоке руйнування. Висновок роблять щодо конкретного матеріалу і режиму експлуатації. Джерела розділу: [1, розд. 8]; [2, розд. 2–3]; [3, розд. про кількісний аналіз].

7. Кристалізаційний тиск і приховане солове пошкодження

Сольові відкладення на зовнішній поверхні не завжди є найнебезпечнішою формою пошкодження. Якщо фронт випаровування розташований у глибині пористого шару, розчин може пересичуватися всередині пор, де кристали ростуть у обмеженому просторі. Залежно від солі, вологості, температури та швидкості висихання виникають цикли кристалізації і повторного розчинення. Вони здатні створювати напруження, особливо коли матеріал уже містить мікротріщини або слабкі контактні зони. Тому на старій цеглі іноді спостерігають не лише білий наліт, а й лущення поверхні та втрату окремих частин черепка.

Різні солі мають неоднакову розчинність і схильність до поглинання води з повітря. Деякі можуть утворювати кристалогідрати й за зміни умов переходити з однієї форми в іншу; об'ємні ефекти таких переходів додатково ускладнюють поведінку матеріалу. Це пояснює, чому для оцінки висолів важливо знати конкретний йонний склад, а не лише загальну масу сухого залишку. Універсальний хімічний засіб, однаково придатний до всіх соляних відкладень, відсутній. Джерела розділу: [1, розд. 3–4]; [2, розд. 2, 5].

Профілактика передбачає пошук джерела солей і води. Якщо солі потрапляють із ґрунтових вод, потрібні заходи від капілярного підсосу; якщо джерело — кладочний розчин або технологічні компоненти, слід контролювати сировину. За наявності вже засолених конструкцій вибір способу очищення й висушування має бути сумісним із матеріалом: різке локальне висихання іноді посилює кристалізаційне пошкодження. Ці положення особливо важливі під час реставрації пористого природного каменю.

8. Водопідготовка й захист технологічних систем

Для різних потреб у будівництві застосовують відстоювання, фільтрацію, пом'якшення або інші види водопідготовки. Фільтрація видаляє переважно завислі частинки, але не обов'язково зменшує концентрацію розчинених Ca^{2+} , Mg^{2+} чи Cl^- . Іонний обмін може змінювати склад розчинених катіонів, а мембранні методи за певних умов знижують загальну мінералізацію. Вибір технології залежить від потрібних показників якості води та кількості стоків, які необхідно відводити або обробляти. Джерела розділу: [3, розд. про розчини]; [1, розд. 8].

Пом'якшення води не завжди вирішує проблему хлоридів або сульфатів. Наприклад, обмін кальцію й магнію на натрій зменшує жорсткість, але за відсутності спеціального видалення аніонів їхня концентрація може залишатися суттєвою. Отже, якщо вода надходить до залізобетонної конструкції, одного показника жорсткості недостатньо для оцінки корозійної небезпеки. Так само вода з низькою мінералізацією за певних умов може інтенсивніше вилугувувати кальцієві сполуки цементного каменю.

Під час контролю водопідготовки важливо зберігати матеріальний баланс солей. Якщо мембрана розділяє потік на очищену воду й концентрат, розчинені речовини переважно не зникають, а переходять у концентрований потік. Це має екологічні та економічні наслідки. У навчальному курсі достатньо показати баланс за масою й концентрацією, а для реального обладнання користуватися інструкціями виробника та вимогами до скидання вод.

9. Розрахунок солевого балансу і практична ситуація

Припустимо, на вологу цегляну кладку за добу надходить 20 л води з концентрацією сумарних розчинних солей 1,5 г/л. Якщо вся вода випарується на поверхні, теоретично у доступній зоні може залишитися до 30 г солей за добу. За 30 діб це становить 900 г, але лише в умовній моделі без винесення солей із поверхні, хімічних реакцій, повторного розчинення й інших шляхів міграції. Навіть цей простий баланс показує, як відносно невелика мінералізація за тривалого надходження води може формувати помітні висоли.

Далі розглянемо два варіанти дій. У першому випадку з поверхні періодично зчищають білий наліт, але джерело підсосу зберігається; розрахунковий потік солей майже не змінюється. У другому випадку усувають надходження води та створюють контрольовані умови висихання; масовий потік до поверхні зменшується. Порівняння демонструє перевагу втручання в механізм перенесення, а не лише в його видимий наслідок. Джерела розділу: [2, розд. 5]; [1, розд. 3–4].

У звіті про якість води потрібно зазначати одиниці вимірювання та умови відбору проб. Концентрація в мг/л, молярна концентрація в ммоль/л і маса солі в кілограмах описують різні величини й не повинні змішуватися без перерахунку. Якщо солі представлені кількома йонами, сума їхніх масових концентрацій має відповідати прийнятій схемі балансу, а не механічному додаванню концентрацій умовних незалежних «солей» без урахування спільних йонів.

10. Комплексна оцінка води для різних будівельних завдань

Для води замішування, ґрунтової води й води системи опалення встановлюють різні показники придатності. Вода замішування має бути сумісною з цементом, добавками й арматурою; підземна вода — характеризуватися з погляду можливого агресивного впливу на бетон та камінь; вода замкненого технічного контуру — з огляду на відкладення, корозію й стабільність роботи обладнання. Однакові показники загальної жорсткості можуть супроводжуватися різним умістом хлоридів, сульфатів і CO_2 , тому інтерпретація завжди залежить від призначення.

Таблиця 16.2. Мінімальна логіка аналізу води

Призначення	Можливий хімічний ризик	Приклад показника
Вода замішування	Зміна гідратації та внесення солей	Придатність за чинними вимогами
Ґрунтова вода	Агресивність щодо цементного каменю	pH, сульфати, CO ₂ та інші компоненти
Вода поблизу арматури	Порушення пасивного стану сталі	Хлориди й водний режим
Вода системи теплообміну	Осадження й корозія	Жорсткість, лужність, pH

У навчальному прикладі дві води мають однакову концентрацію йонів кальцію, але різний уміст CO₂ і гідрогенкарбонатів. Не можна на підставі самого кальцію визначити, чи буде відбуватися розчинення або осадження CaCO₃. Необхідно врахувати кислотно-основну рівновагу і фактичні умови газообміну. Так само неможливо за одним показником електропровідності визначити небезпеку хлоридної корозії арматури.

Практичний висновок: проба води має репрезентувати реальні умови роботи, а протокол — містити методику, дату й одиниці. Джерела розділу: [2, розд. 2–3]; [3, розд. про електроліти].

11. Навчальна задача та висновки

Нехай проба води містить 80 мг/л Ca²⁺ і 24,3 мг/л Mg²⁺. Для навчального розрахунку молярні концентрації становлять приблизно $80/40 = 2,0$ ммоль/л Ca²⁺ та $24,3/24,3 = 1,0$ ммоль/л Mg²⁺. Сумарна кількість цих двозарядних катіонів дорівнює 3,0 ммоль/л, або 6,0 ммоль еквівалентів на літр. Якщо користуються іншими одиницями жорсткості, перерахунок виконують згідно з прийнятим визначенням. Кількісний результат не описує вміст хлоридів чи агресивного CO₂ і не дає повного висновку про придатність води для бетону.

Для профілактики висолів треба зменшити перенесення солевмісної води з основи до поверхні й запобігти циклічному зволоженню. На практиці це включає горизонтальну та вертикальну гідроізоляцію, улаштування водовідведення, контроль складу розчину і просушування конструкції у відповідному режимі. Підсумок: вода одночасно є реагентом, розчинником, електролітом і переносником солей, тому її хімічний аналіз необхідно пов'язувати з умовами міграції в пористому матеріалі.

$$c(\text{Ca}^{2+}) = 80 \text{ мг/л} \div 40 \text{ мг/ммоль} = 2,0 \text{ ммоль/л}$$

(16.4)

Питання для самоперевірки

1. Назвіть головні йони природної води, важливі для будівництва.
2. Чим pH відрізняється від лужності?
3. Поясніть тимчасову й постійну жорсткість.
4. Чому м'яка проточна вода може бути агресивною для цементного каменю?
5. Які хімічні чинники сприяють корозії арматури?
6. Які три умови необхідні для висолоутворення?
7. Чому очищення висолів без усунення вологи часто неефективне?

8. Які обмеження має розрахунок загальної жорсткості?

Використані джерела

[1] Новомлинець О. О., Корзаченко М. М., Сергеев А. І. Будівельне матеріалознавство. Чернігів, 2021. Розд. 3–4, 8.

[2] Пшінько О. М., Савицький М. В., Зінкевич А. М. Відновлення експлуатаційної придатності бетонних, залізобетонних та кам'яних конструкцій. Дніпро, 2018. Розд. 2, 5.

[3] Хоботова Е. Б. Загальна та неорганічна хімія. Ч. 1. Харків: ХНАДУ, 2023. Розділи про розчини, електроліти й кислотно-основні рівноваги.

ТЕМА 17

ПОЛІМЕРНІ, БІТУМНІ, ЛАКОФАРБОВІ, КЛЕЙОВІ ТА ГІДРОІЗОЛЯЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ

1. Основи хімії органічних будівельних матеріалів

Мета лекції. Систематизувати хімічну будову органічних будівельних матеріалів, пояснити механізми полімеризації й твердіння, особливості бітумів, захисних покриттів, клеїв і гідроізоляції та основні чинники їхнього старіння.

План лекції

1. Полімери й типи зв'язків; 2. термопласти та реактопласти; 3. бітумні в'язучі; 4. лакофарбові системи; 5. клеї та герметики; 6. гідроізоляція; 7. старіння, сумісність і безпека.

1.1. Макромолекули, полімеризація і властивості

Полімерні будівельні матеріали містять високомолекулярні сполуки, в яких багато повторюваних ланок поєднані ковалентними зв'язками. Властивості залежать від хімічної природи мономерних ланок, молекулярної маси, розгалуження, ступеня зшивання, кристалічності й наявності наповнювачів. Наприклад, поліетилен, полівінілхлорид, поліуретани й епоксидні композиції різняться за температурною поведінкою та механізмами переробки. Тому визначення «полімерна гідроізоляція» без указання типу зв'язувального компонента не дозволяє оцінити сумісність з розчинником, температурний діапазон або можливість ремонту.

Термопласти за нагрівання можуть розм'якшуватися й перероблятися без обов'язкового руйнування основної макромолекулярної структури в допустимому технологічному інтервалі. Реактопласти після формування просторової сітки зазвичай не плавляться повторно подібно до термопластів. Еластомери здатні до значних оборотних деформацій за відповідної температури й структури. Слід розрізняти «хімічне твердіння» реакційноздатної смоли й «фізичне висихання» полімерної дисперсії: кінцева плівка може формуватися різними механізмами. Джерела розділу: [1, розд. 14]; [2, розд. про органічні матеріали].

2. Полімерні добавки, композити й зв'язок з основою

У будівництві полімери застосовують самостійно та в композитах із мінеральним наповнювачем. Наповнювач впливає на модуль пружності, усадку, теплове розширення, вартість і технологічність, але може створювати дефекти за недостатнього змочування полімером. Межа поділу фаз між наповнювачем та органічним зв'язувальним компонентом визначає передавання навантаження. Тому однакова масова частка смоли не гарантує однакової міцності різних композицій; потрібні відповідні адгезія, зерновий склад та контроль затвердіння.

Полімерцементні розчини поєднують гідратацію цементу з формуванням полімерної фази. За правильного складу полімер може покращувати адгезію, водоутримання й деформаційну здатність, але характер ефекту залежить від сумісності з цементом і режиму догляду. Звичайне додавання невідомої емульсії не дорівнює застосуванню перевіреної

полімерцементної системи: компоненти можуть змінювати повітровміст, гідратацію та водонепроникність. Джерела розділу: [1, розд. 14]; [3, розд. 6].

3. Бітуми та органічні в'язучі

Бітум є складною сумішшю високомолекулярних і низькомолекулярних вуглеводневих та гетероатомних компонентів, а не однією речовиною з постійною формулою. Для навчального опису використовують умовний поділ на фракції, що впливають на в'язкість, пластичність та стійкість до температурних змін. У будівництві бітуми застосовують у покрівельних, дорожніх і гідроізоляційних системах. На їхню роботу впливають температура, швидкість прикладання навантаження, контакт із паливно-мастильними речовинами та процеси старіння.

Окиснювальне старіння й випаровування окремих легких компонентів можуть змінювати співвідношення фракцій, підвищувати крихкість та зменшувати здатність матеріалу переносити деформації. Полімерно-модифіковані бітуми створюють для розширення робочого інтервалу властивостей, проте реальний результат визначають тип полімеру, ступінь сумісності й технологія змішування. Неправильне зберігання або перегрів можуть погіршувати характеристики навіть якісного матеріалу. Джерело розділу: [1, розд. 13].

Таблиця 17.1. Органічні матеріали й особливості застосування

Група	Основний компонент	Типовий механізм формування властивостей
Полімерна мембрана	Термопласт або еластомер	Формування суцільного бар'єра
Бітумний матеріал	Суміш бітумних компонентів	В'язкопружна непроникна фаза
Епоксидний клей	Епоксидна смола та затверджувач	Хімічне зшивання
Акрилове покриття	Полімерний зв'язувальний компонент	Формування плівки або реакційне твердіння
Силіконовий герметик	Полісилоксанова система	Утворення еластичної сітки

Склад компонентів	→	Підготовка основи	→	Нанесення й твердіння	→	Захисна система
-------------------	---	-------------------	---	-----------------------	---	-----------------

Рис. 17.1. Етапи формування органічної захисної системи

4. Лакофарбові матеріали та механізми формування плівки

Лакофарбова система зазвичай містить плівкоутворювач, пігменти, наповнювачі, розчинник або воду та допоміжні компоненти. Грунтовка забезпечує адгезію та, залежно від складу, антикорозійну дію; проміжні та фінішні шари формують бар'єр і забезпечують потрібні декоративні властивості. Деякі композиції твердіють унаслідок випаровування розчинника, інші — через реакції зшивання, окиснення або взаємодію з вологою. Ці механізми визначають допустимі умови нанесення та час міжшарового перекриття.

Адгезія залежить від поверхневої енергії, змочування, шорсткості й чистоти основи. Залишкові солі на сталі можуть викликати осмотичне здуття під щільним покриттям, а пил і мастила — відшарування. Для бетону критичні вологість, стан слабого поверхневого шару й лужність. Тому паспортна хімічна стійкість сухої плівки не гарантує довговічності погано

підготовленої системи. У практиці важливі вибір повної сумісної системи, контроль товщини та випробування адгезії. Джерела розділу: [1, розд. 17]; [4, розд. 11].

5. Клеї, герметики й фізико-хімія адгезії

Клейове з'єднання утворюється завдяки змочуванню основи, міжмолекулярним взаємодіям, можливим хімічним зв'язкам і механічному зачепленню в мікронерівностях. Різні системи мають власні механізми затвердіння: епоксидні смоли реагують із затверджувачем, деякі поліуретани — з відповідними компонентами чи вологою, дисперсійні клеї формують полімерну плівку після видалення води. Для міцності важливо дотримуватися співвідношення реакційних компонентів, часу життєздатності суміші та умов твердіння.

Герметик повинен не тільки прилипати до поверхні, а й переносити проєктні деформації шва без відриву або розриву. Тому висока твердість чи максимальна міцність на стиск не є універсальними критеріями придатності герметика. Для пористих мінеральних основ можуть бути потрібні спеціальні праймери, а для деяких полімерів — перевірка сумісності на міграцію пластифікаторів. На фасадах і покрівлях додатковими факторами виступають ультрафіолет, вода й цикли температури. Джерела розділу: [1, розд. 14]; [3, розд. 6].

6. Гідроізоляція та шляхи проникнення води

Гідроізоляційні матеріали можуть діяти як суцільний бар'єр, змінювати змочування поверхні або ущільнювати порову структуру. До бар'єрних систем належать рулонні, мастикові й мембранні матеріали; до інших — окремі проникні та полімерцементні композиції, механізм яких залежить від складу. Не можна вважати всі гідрофобізувальні покриття водонепроникними під гідростатичним тиском. Для підземних конструкцій потрібна система, розрахована на фактичний напрямок і величину водного впливу.

Найслабшими місцями гідроізоляції часто є стики, примикання, деформаційні шви й проходи комунікацій. Хімічна стійкість матеріалу має поєднуватися з достатньою еластичністю, адгезією та стійкістю до проколів. Під час ремонту важливо встановити джерело води й стан основи: нанесення полімерної мембрани на вологу нестабільну поверхню може створити замкнений простір із надлишковим тиском пари або спричинити відшарування. Джерела розділу: [1, розд. 13–14]; [3, розд. 5–6].

7. Додаткові аспекти сумісності багат шарових систем

У багат шарових покриттях кожен шар має свою функцію: підготовчий матеріал змінює стан поверхні, ґрунтовка забезпечує адгезію, проміжний шар формує товщину й бар'єр, фінішний — додаткову стійкість до атмосферних впливів та потрібний вигляд. Однак окремі компоненти можуть бути хімічно несумісними. Розчинник нового шару іноді розм'якшує попередній, а різні температурні деформації спричиняють відшарування. Тому система повинна розглядатися як перевірений комплекс, а не випадкова сукупність продуктів із подібними рекламними характеристиками.

Для мінеральних основ важливі залишкова вологість і лужність, особливо якщо покриття має чутливі до гідролізу або омилення компоненти. Нанесення щільної мембрани на основу, що надалі зволожується знизу, може спричиняти здуття й накопичення солей. Для металевої основи критичні очистка від хлоридів і якість профілю шорсткості. Усі ці параметри впливають на межу розділу між матеріалом конструкції та захисним шаром. Джерела розділу: [1, розд. 14, 17]; [3, розд. 5–6].

Під час ремонту старих покриттів слід з'ясувати, чи сумісна нова система з залишками попередньої. Видимий стан поверхні не завжди дає інформацію про тип старого полімеру та його адгезію. На пробній ділянці оцінюють очищення, можливу реакцію на розчинник, висихання і зчеплення. Якщо матеріал містить небезпечні історичні пігменти чи інші компоненти, підготовка поверхні потребує спеціальних заходів поводження з пилом і відходами.

8. Теплове, фотохімічне та водне старіння полімерів

Під дією світла й кисню в полімерному ланцюзі можуть утворюватися реакційно здатні центри, що запускають подальше окиснення, розрив або зшивання макромолекул. Зовні процеси можуть виявлятися втратою еластичності, появою крейдування, зміною кольору й утворенням дрібних тріщин. Швидкість залежить від хімічної структури зв'язувального компонента, наявності стабілізаторів, температури та інтенсивності випромінювання. Не всі полімери однаково чутливі: для окремих систем достатньо штатної атмосферної стійкості, для інших потрібен додатковий захисний шар.

Контакт із водою може викликати набухання, вимивання добавок і, для певних хімічних груп, реакції гідролізу. Окремо оцінюють дію розчинників, мастил і технологічних рідин: матеріал, стійкий до дощової води, може втрачати міцність у контакті з вуглеводневим розчинником. Водонепроникність і паропроникність також різні властивості. Для покрівельних і фасадних систем важливо враховувати можливість дифузії водяної пари та режим висихання конструкції. Джерела розділу: [1, розд. 13–14].

За прискорених лабораторних випробувань матеріали піддають підвищеним температурам, зволоженню або штучному опроміненню, щоб порівняти поведінку систем. Проте результати таких випробувань не слід автоматично переводити в точний календарний строк служби без підтвердженої моделі. У реальній експлуатації одночасно діють ультрафіолет, температура, механічні деформації, забруднення й нерівномірна вологість; їхні ефекти можуть підсилювати один одного.

9. Хімічна та пожежна безпека органічних матеріалів

Робота з реакційноздатними клеями й покриттями вимагає знання складу компонентів і умов їхнього твердіння. Деякі затверджувачі та розчинники можуть бути подразниками або мати інші небезпечні властивості; тому застосовують лише конкретні засоби захисту й вентиляцію, передбачені паспортом безпеки. Під час змішування реакційноздатних

компонентів може виділятися теплота, а час придатності композиції після змішування обмежений. Не можна самостійно змінювати рекомендовані масові співвідношення тільки для прискорення твердіння.

Бітумні матеріали під час нагрівання створюють температурну небезпеку; перегрів і контакт із джерелами займання можуть спричиняти пожежні ризики. Для будь-якого матеріалу на основі органічних сполук потрібно окремо оцінювати пожежну класифікацію готової системи й умови монтажу. Хімічна природа полімеру не дозволяє без випробувань установити характеристики димоутворення, поширення полум'я або вогнестійкості конструкції. Джерело розділу: [1, розд. 13–14].

Екологічний аспект включає випаровування розчинників, правильне поводження із залишками смол та забрудненою тарою, можливість роздільного збирання й повторного використання окремих термопластів. Реактопластичні композити й багатошарові системи можуть бути складнішими для перероблення. Вибір менш небезпечного продукту має базуватися на перевірених характеристиках усієї технології й довговічності, а не лише на одному показнику початкового складу.

10. Порівняння способів гідроізоляції за механізмом дії

Умовна підземна стіна потребує захисту від ґрунтової вологи, покрівля — від дощової води й температурних деформацій, а сталевий міст — від атмосферної корозії. У першому випадку важливі гідростатичний тиск, стики й сумісність з бетонною основою; у другому — еластичність, ультрафіолетова й температурна стійкість; у третьому — підготовка металу, бар'єрна дія й доступність повторного фарбування. Матеріал, що добре працює в одному сценарії, не обов'язково придатний для іншого.

Таблиця 17.2. Механізми захисту в органічних системах

Тип	Принцип роботи	Ключове обмеження
Бітумна мембрана	Суцільний гідроізоляційний бар'єр	Термічна й механічна поведінка
Полімерна мембрана	Бар'єр із заданою деформаційною здатністю	Стики, проколи й сумісність
Гідрофобізувальний засіб	Зменшення капілярного змочування	Не завжди захищає від напірної води
Лакофарбова система	Захист поверхні від атмосферного середовища	Адгезія, товщина і старіння

Під час вибору потрібно порівнювати всю систему, включно з праймером, основним матеріалом, деталями примикань і способом контролю якості. Для багатошарових композицій слід перевіряти час висихання та допустимий інтервал нанесення наступного шару; для реакційноздатних смол — співвідношення компонентів і час твердіння. Дешевша закупівельна ціна матеріалу не дає повної інформації про витрати на підготовку основи, ремонт і строк експлуатації.

Навчальний підсумок: хімічна природа визначає потенційні характеристики системи, але експлуатаційну придатність підтверджують випробуванням, технологією нанесення та належним технічним обслуговуванням. Джерела розділу: [1, розд. 13–14, 17]; [3, розд. 5–6].

11. Старіння, безпека й навчальний розрахунок

Полімери й органічні покриття можуть старіти внаслідок фотоокиснення, термічної деструкції, гідролізу, втрати пластифікаторів і багаторазових деформацій. Вибір захисту залежить від типу полімеру: добавка, ефективна для одного зв'язувального компонента, не обов'язково придатна для іншого. Під час роботи з реакційноздатними смолами, розчинниками та гарячими бітумами обов'язкові вимоги паспорта безпеки, вентиляція й засоби індивідуального захисту. Навчальні хімічні формули не слід використовувати для самостійного змішування промислових реактивів поза затвердженою технологією.

Для покриття площею 120 м² за питомої витрати матеріалу 0,45 кг/м² теоретична маса становить 54 кг. За умовних технологічних втрат 8 % доцільно розрахувати потребу як $54/(1-0,08) \approx 58,7$ кг, якщо втрати визначені часткою закупленої маси. Якщо виробник указує число шарів, масу сухого залишку або густину, розрахунок необхідно скоригувати. Підсумок теми: довговічність органічної системи визначається хімією полімеру, підготовкою основи, сумісністю шарів і реальним режимом експлуатації.

$$m(\text{теор.}) = S \cdot q \quad (17.1)$$

Питання для самоперевірки

1. Чим відрізняються термопласти від реактопластів?
2. Які чинники визначають властивості полімерного композиту?
3. Чому бітум не має єдиної хімічної формули?
4. Назвіть основні механізми твердіння лакофарбових покриттів.
5. Які складові визначають міцність клейового з'єднання?
6. Чим гідрофобізація відрізняється від гідроізоляції під тиском?
7. Які фактори сприяють старінню полімерів?
8. Як визначити кількість матеріалу з урахуванням технологічних втрат?

Використані джерела

[1] Новомлинець О. О., Корзаченко М. М., Сергєєв А. І. Будівельне матеріалознавство. Чернігів, 2021. Розд. 13–14, 17.

[2] Хоботова Е. Б. Загальна та неорганічна хімія. Ч. 1. Харків: ХНАДУ, 2023. Розділи про хімічний зв'язок та фізико-хімічні процеси.

[3] Пшінько О. М., Савицький М. В., Зінкевич А. М. Відновлення експлуатаційної придатності бетонних, залізобетонних та кам'яних конструкцій. Дніпро, 2018. Розд. 5–6.

[4] Білоусова Н. А., Погребова І. С., Лінючев О. Г. Корозія та захист від корозії. Київ, 2024. Розд. 11–12.

ТЕМА 18

ХІМІЧНІ МЕТОДИ ЗАХИСТУ ТА ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ І КОНСТРУКЦІЙ

1. Комплексний підхід до довговічності конструкцій

Мета лекції. Узагальнити хімічні механізми пошкодження будівельних матеріалів і систематизувати методи їх первинного та вторинного захисту: модифікування складу, гідрофобізацію, просочення, захисні покриття, ремонт і контроль довговічності.

План лекції

1. Довговічність і діагностика; 2. первинний захист бетону; 3. вторинні покриття; 4. гідрофобізація та просочення; 5. захист металів і арматури; 6. ремонтні матеріали; 7. контроль, розрахунок та екологічні аспекти.

1.1. Довговічність як результат роботи системи

Довговічність будівельної конструкції визначається не лише початковою міцністю, а й здатністю зберігати потрібні характеристики під час тривалої дії механічних навантажень, води, температури, розчинених солей і газів. Для кожного матеріалу небезпеки різні: цементний камінь може вилугуватися чи зазнавати сульфатної агресії, арматура — електрохімічно кородувати, карбонатний камінь — розчинятися в кислому середовищі, полімерна мембрана — старіти під дією ультрафіолету. Нерідко пошкодження розвиваються одночасно й підсилюють одне одного.

Вибір хімічного захисту починається з визначення середовища, механізму ушкодження, стану матеріалу й можливості усунути причину. Наприклад, відновлення лакофарбового шару не вирішить проблему застою води, а герметизація поверхні може бути неефективною за капілярного підсосу з фундаменту. Доцільно розділяти первинний захист, закладений у складі та конструкції матеріалу, і вторинний, що передбачає додаткові системи ізоляції або поверхневої обробки. Джерела розділу: [1, розд. 5–6]; [2, розд. 8–9].

2. Первинний захист: склад бетону й конструктивні рішення

Первинний захист бетону охоплює вибір відповідного цементу й заповнювачів, контроль водоцементного відношення, застосування перевірених мінеральних і хімічних добавок, належне ущільнення та догляд. Головне завдання часто полягає у зменшенні проникності та обмеженні швидкості надходження агресивних речовин. У відповідних середовищах добирають матеріали з урахуванням сульфатної стійкості, морозостійкості або ризику лужно-кремнеземної реакції. Для залізобетону важлива також товщина й цілісність захисного шару над арматурою.

Конструктивні рішення — водовідведення, герметизація швів, захист торців і запобігання накопиченню води — нерозривно пов'язані з хімічною стійкістю. Навіть бетон із хорошими лабораторними характеристиками може швидко пошкоджуватися, якщо тріщини забезпечують прямий доступ хлоридної води до арматури. Тому довговічність не зводиться до

вибору «найкращої добавки»: якісний результат досягають сумісною системою проектування, виробництва й експлуатаційного контролю. Джерела розділу: [1, розд. 5.1]; [2, розд. 7–8].

3. Гідрофобізація, просочення й ущільнення поверхні

Гідрофобізувальні засоби змінюють характер змочування поверхні пористого матеріалу водою, зменшуючи капілярне всмоктування. У частині систем застосовують кремнійорганічні сполуки, які після відповідних перетворень створюють водовідштовхувальні групи на поверхні пор. Оскільки тонкий оброблений шар не завжди перекриває відкриті пори, водяна пара може й надалі проходити крізь матеріал. Це корисно для фасадів, однак гідрофобізацію не можна автоматично розглядати як повноцінну гідроізоляцію за наявності гідростатичного тиску або великих тріщин.

Інші просочувальні системи здатні заповнювати частину пор і зменшувати проникність; їхній ефект залежить від в'язкості, розміру молекул, хімічної сумісності й глибини проникнення. Надмірно щільний поверхневий шар на матеріалі, що продовжує зволожуватися зсередини, може створювати умови для накопичення вологи та солей під покриттям. Перед обробкою потрібно оцінити вологість, солевміст, міцність основи й можливість випаровування. Джерела розділу: [1, розд. 5–6]; [2, розд. 13–14].

Таблиця 18.1. Порівняння способів захисту

Спосіб	Основний механізм	Важливе обмеження
Модифікування складу бетону	Зменшення проникності й підвищення хімічної стійкості	Вимагає контролю сумісності й технології
Гідрофобізація	Зменшення змочування поверхні	Не усуває великі тріщини та тиск води
Полімерне покриття	Формування суцільного бар'єра	Критична підготовка й вологість основи
Цинкування сталі	Бар'єрна і за певних умов протекторна дія	Потрібен контроль товщини та середовища
Ремонтний розчин	Відновлення геометрії й захисного шару	Потрібна сумісність з основою

Діагностика	→	Вибір матеріалу	→	Підготовка й захист	→	Контроль довговічності
-------------	---	-----------------	---	---------------------	---	------------------------

Рис. 18.1. Цикл забезпечення та перевірки захисту конструкцій

4. Покриття для бетону, каменю та металу

Для бетону використовують мінеральні, полімерцементні й полімерні системи, а також мембрани та інші спеціалізовані продукти. Вибір залежить від механізму агресії, наявності тріщин, паропроникності, можливого гідростатичного тиску й режиму експлуатації. Для природного каменю особливо важлива сумісність засобу з мінералогічним складом і солевмісністю основи. Непридатна плівка може змінювати зовнішній вигляд, затримувати вологу й прискорювати відшарування на межі обробленої та необробленої зони.

Для металевих конструкцій покриття зазвичай утворюють систему з підготовки поверхні, ґрунтувального шару та одного чи кількох наступних шарів. Механізм може бути

бар'єрним, пасивувальним або поєднуватися з електрохімічною дією металевого покриття. Цинкові системи за відповідних умов здатні захищати сталь поблизу локального пошкодження, чого не забезпечує звичайний органічний бар'єр. Але жодне покриття не компенсує повністю помилки у водовідведенні, конструкції щілин чи контролі агресивних забрудників. Джерела розділу: [1, розд. 5]; [3, розд. 11–12].

5. Інгібітори корозії та електрохімічні методи

Інгібітори — це речовини, які за відповідної концентрації зменшують швидкість корозійних процесів у конкретному середовищі. За механізмом вони можуть впливати переважно на анодні, катодні або обидві складові. Для їхнього застосування важливі сумісність із матеріалом, стабільність, ризики локального дефіциту інгібітора та екологічні обмеження. Не можна припускати, що будь-який інгібітор для відкритої сталі буде ефективним усередині бетону або в іншій водній системі без підтверджувальних випробувань.

Електрохімічні методи захисту, зокрема катодний захист, змінюють електродний стан металу, зменшуючи його анодне розчинення. У підземних та інших спеціальних спорудах такі системи потребують проєктування, електричного моніторингу й узгодження з матеріалами конструкції. У ремонті залізобетону іноді розглядають електрохімічні технології залежно від концентрації хлоридів і стану арматури, проте це не заміна діагностики. Джерела розділу: [1, розд. 2.6, 5]; [3, розд. 11–13].

6. Ремонтний матеріал і сумісність з основою

Під час ремонту бетонних і кам'яних конструкцій важливо забезпечити не тільки необхідну міцність нового матеріалу, а і його адгезію, деформаційну сумісність, подібний тепловий рух і відповідний вологоперенос. Занадто жорсткий ремонтний розчин на слабкій історичній кладці може створювати концентрації напружень, а занадто щільна поверхнева система — утруднювати висихання. Для залізобетону перед відновленням захисного шару слід установити стан арматури та за необхідності видалити продукти корозії, передбачити відповідну обробку сталі.

Ремонтні матеріали добирають за фактичним механізмом пошкодження. Якщо середовище містить агресивні йони, новий матеріал повинен бути придатним до відповідного впливу; якщо можливі активні тріщини, потрібна система, яка переносить деформації, або обґрунтована схема шва. Підготовка основи включає видалення неміцних ділянок, очищення й приведення вологості до умов, установлених виробником. Хімічна сумісність, режим твердіння та контроль адгезії мають таке саме значення, як розрахункова міцність матеріалу. Джерело розділу: [1, розд. 4–6].

7. Поєднання первинного та вторинного захисту

У реальному будівельному проєкті первинний і вторинний захист мають працювати узгоджено. Щільний бетон із відповідним складом зменшує проникнення води й солей, а правильно підібрана поверхнева система додатково обмежує їх надходження в критичних

зонах. Якщо захисне покриття з часом пошкоджується, первинна стійкість основи залишається важливою резервною характеристикою. Навпаки, якщо бетон надмірно пористий або містить відкриті тріщини, одне покриття може зазнавати підвищеного впливу вологи зсередини. Джерела розділу: [1, розд. 5–6]; [2, розд. 7–8].

Для підземної споруди систему обирають після визначення рівня ґрунтових вод, можливого гідростатичного тиску, хімічного складу води та рухів конструкції. Для фасаду важливі дощове зволоження, висихання й перенос солей; для промислової підлоги — склад технологічних рідин, механічний знос і температура. Один «універсальний» гідроізоляційний матеріал не обов’язково відповідатиме всім цим сценаріям. Підбір має бути обґрунтований характеристиками кожного шару, стиків і примикань.

Профілактика часто економніша за усунення розвиненого руйнування, але порівняння варіантів потребує врахування строку служби й доступності ремонту. Дешева початкова обробка може вимагати частого поновлення, тоді як багатошарова система з більшими початковими витратами може мати інший графік технічного обслуговування. Для навчального аналізу важливо скласти таблицю можливих відмов, причин їх появи й методів контролю, не підміняючи випробування рекламними обіцянками виробника.

8. Контроль якості ремонтних і захисних робіт

Контроль починають до нанесення матеріалу: визначають міцність основи, очищення, шорсткість, температуру та вологість. Для реакційноздатних композицій перевіряють співвідношення компонентів і час життєздатності суміші, для мінеральних ремонтних розчинів — допустиме водовміст і режим догляду. Після нанесення контролюють товщину, суцільність, адгезію або інші показники відповідно до типу системи. Складна конструкція може мати локальні зони підвищеного ризику — кромки, кути, шви та проходи комунікацій — де потрібна окрема увага. Джерела розділу: [1, розд. 4–6]; [3, розд. 11–13].

Для бетону інколи потрібно підтверджувати глибину проникнення просочення або фактичне зниження капілярного водопоглинання. Для металу вимірюють товщину покриття й оцінюють залишкові солі після підготовки. Якість контролю залежить від правильного вибору методики: вимірювання товщини не виявить усіх дефектів адгезії, а локальна перевірка відривом не завжди характеризує суцільність мембрани на великій площі. Тому програму приймання формують під конкретний механізм захисту.

Після введення конструкції в експлуатацію необхідні періодичні огляди та фіксація змін. Карта тріщин, фотографії одних і тих самих ділянок, результати вимірювань вологості чи потенціалів можуть показувати тенденцію, але інтерпретувати їх слід з урахуванням сезонних умов. Висока якість первинного ремонту не скасовує технічного обслуговування, особливо за змінного й агресивного середовища.

9. Матеріальний баланс, екологічні вимоги та підсумковий кейс

Нехай потрібно захистити 260 м² бетонної поверхні двошаровим покриттям, паспортна витрата якого становить 0,35 кг/м² на один шар. Без урахування втрат необхідно $260 \cdot 0,35 \cdot 2 = 182$ кг продукту. Якщо під час нанесення прогнозовано втрату 7 % від закупленої маси, потреба дорівнює $182 / (1 - 0,07) \approx 195,7$ кг. Якщо паспортна витрата наведена як сумарна на всі шари, її не можна повторно множити на два. Для реакційноздатних систем треба окремо обліковувати співвідношення компонентів та їхні залишки.

План робіт повинен передбачати поводження з відходами очищення: старою фарбою, іржею, бетонним пилом, промивними водами й залишками хімічних препаратів. Деякі відходи потребують спеціального збирання та передачі відповідним операторам залежно від їхнього складу. Не можна змивати в каналізацію залишки концентрованих ремонтних чи захисних хімічних продуктів без установленної процедури. Для працівників використовують паспорт безпеки й затверджену інструкцію з охорони праці.

У підсумковому кейсі розглядають залізобетонну споруду, на якій одночасно спостерігають висоли, локальне відшарування бетону й корозію відкритої арматури. Послідовність аналізу така: встановити джерело води, виконати хімічний аналіз солей, перевірити глибину карбонізації та стан арматури, обґрунтувати усунення шляхів зволоження, вибрати сумісний ремонтний матеріал і систему вторинного захисту. Після виконання потрібен план моніторингу. Такий алгоритм поєднує всі основні поняття курсу — хімічні реакції, електрохімію, водний режим і матеріальний баланс.

10. Зведена програма забезпечення довговічності

Для завершення курсу доцільно розглядати довговічність як послідовність контрольованих рішень. Спочатку встановлюють фактичні умови роботи конструкції й потенційні хімічні механізми пошкодження. Далі обирають матеріали з потрібною стійкістю, забезпечують відповідну геометрію, дренаж і захисні шари. Після будівництва виконують приймальні випробування, а під час експлуатації проводять огляди та своєчасно усувають локальні дефекти. Якщо середовище змінюється, попередню оцінку потрібно переглядати.

Таблиця 18.2. Цикл управління довговічністю

Етап	Завдання	Приклад контролюючого результату
Проектування	Встановлення агресивних впливів	Дані про воду, ґрунт і атмосферу
Виготовлення	Контроль складу й технології	Протоколи суміші та догляду
Нанесення захисту	Підготовка основи й суцільність	Товщина покриття або характеристики просочення
Експлуатація	Регулярне виявлення дефектів	Карта тріщин і стану поверхні

У ситуації з корозією арматури не можна обмежуватися очищенням доступного металу й косметичним закриттям дефекту. Потрібно з'ясувати, чи зберігаються джерела вологи та хлоридів, чи достатній залишковий переріз арматури, чи сумісний ремонтний матеріал і чи

усунуто шлях повторного проникнення води. Для кам'яної кладки аналогічно необхідно встановити причини засолення, оскільки недоцільне щільне покриття може погіршити вологісний режим.

Отже, хімічний захист повинен об'єднувати знання про реакції, перенесення речовин, будову матеріалу й технологію ремонту. Джерела розділу: [1, розд. 4–6]; [2, розд. 7–9]; [3, розд. 11–13].

11. План обстеження, контроль і навчальний розрахунок

Послідовність робіт із підвищення довговічності включає встановлення причини дефекту, аналіз середовища, вибір системи захисту, перевірку сумісності, підготовку поверхні, нанесення та приймальний контроль. Надалі потрібні огляди, оцінювання тріщин, вологості й цілісності покриття. Для металевих конструкцій контролюють також втрати перерізу й стан зварних вузлів, для бетону — можливі ознаки корозії арматури й проникнення агресивних йонів. Окремий показник, наприклад товщина плівки, не доводить, що система в цілому працює належним чином.

Для навчального розрахунку площа поверхні становить 180 м², нормативна теоретична витрата просочення — 0,30 кг/м². Потрібна маса становить 54 кг. За двох шарів з однаковою питомою витратою результат дорівнює 108 кг, але лише якщо паспорт передбачає цю витрату окремо для кожного шару. За втрат 10 % від закупленого обсягу потреба становитиме 108/0,90 = 120 кг. Фактична витрата змінюється з пористістю та способом нанесення й має підтверджуватися пробною ділянкою. Підсумок: довговічність забезпечує не окремий препарат, а перевірена система «склад — конструкція — захист — контроль».

$$m(\text{закуп.}) = S \cdot q \cdot n / (1 - \text{квтрт}) \quad (18.1)$$

Питання для самоперевірки

1. Чим первинний захист бетону відрізняється від вторинного?
2. Чому гідрофобізація не завжди забезпечує захист від напірної води?
3. Які чинники визначають адгезію покриття до бетонної основи?
4. Порівняйте бар'єрну дію полімеру й протекторну дію цинку.
5. Що характеризує інгібітор корозії?
6. Які показники визначають сумісність ремонтного матеріалу?
7. Навіщо контролювати стан конструкції після ремонту?
8. Як розрахувати масу покриття за площею та питомою витратою?

Використані джерела

[1] Пшінько О. М., Савицький М. В., Зінкевич А. М. Відновлення експлуатаційної придатності бетонних, залізобетонних та кам'яних конструкцій. Дніпро, 2018. Розд. 4–6.

[2] Новомлинець О. О., Корзаченко М. М., Сергеев А. І. Будівельне матеріалознавство. Чернігів, 2021. Розд. 7–9, 13–14, 17.

[3] Білоусова Н. А., Погребова І. С., Лінючев О. Г. Корозія та захист від корозії. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. Розд. 11–13.

ОСНОВНІ ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Новомлинець О. О., Корзаченко М. М., Сергєєв А. І. Будівельне матеріалознавство. Чернігів: НУ «Чернігівська політехніка», 2021. 420 с.
2. Пшінько О. М., Савицький М. В., Зінкевич А. М. Відновлення експлуатаційної придатності бетонних, залізобетонних та кам'яних конструкцій. Дніпро, 2018. 220 с.
3. Білоусова Н. А., Погребова І. С., Лінючев О. Г. Корозія та захист від корозії. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 180 с.
4. Хоботова Е. Б. Загальна та неорганічна хімія. Частина 1. Загальна хімія. Харків: ХНАДУ, 2023.
5. Хоботова Е. Б. Загальна та неорганічна хімія. Частина 2. Неорганічна хімія. Харків: ХНАДУ, 2026. 300 с.
6. Назарко І. С., Вічко О. І. Загальна хімія: навчальний посібник для студентів технічних спеціальностей. Тернопіль: ТНТУ, 2019. 192 с.
7. Власенко Н. Є., Коваленко І. В., Потаскалов В. А. Хімія. Частина 1. Загальна хімія. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025.
8. Петрушина Г. О., Пугач Л. І., Завріна С. В. Загальна та неорганічна хімія. Дніпропетровськ: Пороги, 2016. 328 с.
9. Євсєєва М. В., Ранський А. П., Гордієнко О. А. Електрохімічні процеси: теорія та практикум. Вінниця: ВНТУ, 2017. 111 с.
10. Булавін В. І. та ін. Практикум з основ загальної хімії. 3-тє вид., допов. і випр. Харків: НТУ «ХП», 2017.