

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ЗПО «ДПТК»

Олександр СТІЛЕЦЬ

« 28 » серпня 2026 р.

ПОГОДЖЕНО

Заступник директора НМР ЗПО «ДПТК»

Сергій ГОРДІЄНКО

« 28 » серпня 2026 р.

**МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ
ДО ВИКОНАННЯ ПРАКТИЧНИХ РОБІТ
З ДИСЦИПЛІНИ ОК11 «ХІМІЯ»**

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

Спеціальність G19 «Будівництво та цивільна інженерія»

ЗМІСТ

- Практична робота 1. Матеріальний баланс перетворення технічної сировини: стехіометрія, надлишок реагентів та вихід продуктів
- Практична робота 2. Розрахунок складу технологічних розчинів і кислотно-основної обробки: розведення, рН та нейтралізація
- Практична робота 3. Кількісний аналіз окисно-відновних перетворень металів та електролітичного осадження покриттів
- Практична робота 4. Матеріальний баланс повітряних в'язучих: випалювання вапняку, гашення вапна і твердіння гіпсу
- Практична робота 5. Хімічний баланс портландцементу та бетонної суміші: гідратація, водоцементне відношення й добавки
- Практична робота 6. Сировинний та тепловий баланс керамічних і скляних матеріалів: дегідроксилювання та газовиділення
- Практична робота 7. Аналіз будівельної води: жорсткість, солевміст, агресивність і можливе висолоутворення
- Практична робота 8. Розрахунок корозійних втрат арматури та витрати матеріалів для протикорозійного захисту
- Практична робота 9. Матеріальний баланс ремонтного й гідроізоляційного захисту: полімери, покриття та рулонні матеріали

Як працювати з цим посібником

Кожна з дев'яти практичних робіт побудована як навчальна ситуація з 12–20 взаємозв'язаними діями та перевітками. Перші три роботи є спільним загальнохімічним блоком із методичних рекомендацій G9; роботи 4–9 розроблено для будівельного спрямування. Умови блоків А, Б і В спільні для групи, змінюються дані особистого варіанта (1–30).

Основний блок А включає близько десяти послідовних розрахункових кроків. Блок Б змінює початкові умови або розширює виробничу ситуацію, не вводячи непояснених законів. Блок В вимагає кількісної перевірки або короткого аргументованого висновку. Для всіх студентів обов'язкові А й Б, а перевірки В є частиною оформлення.

Теорія, довідкові значення, рівняння реакцій та формули наведені безпосередньо в методичці. Студентові не потрібно самостійно шукати довідкові дані для виконання основної частини; додаткові пояснення можна брати з рекомендованих підручників.

Числові показники виходу продуктів, складу сировини, вологості, ступеня перетворення та витрат захисних матеріалів є умовними навчальними величинами. Вони не є нормативами якості будівельних матеріалів, технологічними регламентами чи проєктними вимогами.

Усі розрахунки оформлюються як «формула — підстановка — результат з одиницями». На завершення потрібно перевірити хоча б два незалежні баланси та написати короткий висновок про вплив вихідних умов на результат.

Відповідність практичних робіт лекційним темам.

Роботи 1–3 використовують спільний блок лекцій 1–8; наступні 6 робіт охоплюють спеціалізовані теми 9–18. Окремі теми повторюються в інтегрованих завданнях, оскільки хімічні процеси матеріалів взаємопов'язані.

ПР №	Лекційні теми	Зміст розрахунків
1	1, 3	Стехіометрія; карбонатна будівельна сировина
2	4–5	Розчини, концентрації, рН і нейтралізація
3	2, 7–8	ОВР, електроліз і металеві покриття
4	9–10	Властивості сировини; вапно та гіпс
5	11–12	Портландцемент, гідратація, бетон і добавки
6	9, 13	Керамічні, силікатні та скляні матеріали
7	15–16	Хімічне руйнування бетону; вода, солі, висоли
8	8, 14, 18	Арматура, корозія і металозахист
9	15, 17–18	Ремонт і захист, полімери, бітум, гідроізоляція

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 1

Матеріальний баланс перетворення технічної сировини: стехіометрія, надлишок реагентів та вихід продуктів

Мета:

Відпрацювати повний матеріальний баланс однієї реакції: від складу технічної сировини до потреби в реагентах, об'єму газу, виділення продукту та нейтралізації залишку кислоти.

Єдина виробнича/навчальна ситуація. НАВЧАЛЬНА МОДЕЛЬ. Лабораторна партія технічного карбонату кальцію з інертними домішками повністю реагує з HCl . Кислота подається з надлишком. CaCl_2 виділяють із заданим коефіцієнтом вилучення, а частину утвореного CO_2 фізично збирають. Залишкову кислоту нейтралізують NaOH . Другу партію обробляють за тими самими умовами. Зв'язок із будівництвом: CaCO_3 — основна складова вапняків; дана кислотна реакція є лише аналітичною моделлю визначення вмісту карбонату в пробі будівельної сировини, а не способом промислового виробництва вапна.

1. Теоретичні відомості

Хімічне рівняння дає кількісні співвідношення між реагентами та продуктами. Для реакції карбонату кальцію з кислотою одному молю CaCO_3 відповідають два молі HCl , один моль CaCl_2 та один моль CO_2 . Під час розрахунку не можна порівнювати маси речовин без переходу до їхніх молярних мас.

Технічна сировина містить реакційноздатну речовину й інертні домішки. Масову частку чистого CaCO_3 необхідно перетворювати з відсотків у частку одиниці. Лише чиста частина бере участь у стехіометрії; домішки входять до матеріального балансу сировини, але не до рівняння реакції.

Маса чистої HCl , обчислена за реакцією, є теоретичною витратою. Якщо кислоту подають із надлишком, необхідно спочатку збільшити масу чистої HCl на частку надлишку, а

вже потім поділити на її масову частку в розчині. Маса води у введеному розчині — різниця мас розчину і кислоти.

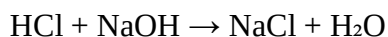
Теоретичний вихід продуктів визначають із кількості CaCO_3 , що вступив у реакцію. Коефіцієнт вилучення солі описує наступну операцію збирання CaCl_2 і не змінює кількість CO_2 , яку передбачає хімічне рівняння. Окремо може бути задана ефективність фізичного збирання газу.

Молярний об'єм 22,4 л/моль застосовуємо лише до газу, приведенного до нормальних умов. Якщо газ не приведено до них, його об'єм треба визначати за іншими даними про температуру та тиск; у цій роботі такі перерахунки не потрібні.

Надлишкова кислота після повного перетворення CaCO_3 є потенційним реагентом нейтралізації. Для рівняння $\text{HCl} + \text{NaOH}$ співвідношення молів дорівнює 1:1. Кількість луку визначають за надлишковою чистою HCl , а не за всією введеною кислотою.

Підсумковий матеріальний баланс розділяє первинну реакцію, фізичне вилучення солі, уловлювання газу та нейтралізацію. Саме це дозволяє встановити, у якому місці виникають відмінності між теоретичною кількістю речовин і кількістю фактично отриманих матеріалів.

2. Хімічні рівняння та припущення



m — грами; p, w, δ , η — частки одиниці; n — молі; V — літри; $V_m = 22,4$ л/моль за н. у. Молярні маси, г/моль: CaCO_3 100,09; HCl 36,46; CO_2 44,01; CaCl_2 110,98; NaOH 40,00.

3. Формули для самостійного розрахунку

Як читати та застосовувати формули. Порядок роботи з формулами: спершу виділіть у технічній сировині чисту речовину; далі переведіть її масу в молі та скористайтесь коефіцієнтами хімічного рівняння. Лише після теоретичного балансу додавайте надлишок кислоти, виходи й втрати під час уловлювання. Маси речовин у грамах і маси водних розчинів — різні величини.

$$m(\text{чист.}) = m(\text{зразка}) \cdot p \quad (1.1)$$

Пояснення до формули (1.1). Спочатку визначаємо масу саме реакційноздатного карбонату. p — частка чистого CaCO_3 , яку переводимо з відсотків у десятковий дріб: 92 % $\rightarrow$ 0,92. Ця маса, а не маса технічного зразка, переходить до наступного кроку.

$$m(\text{домішок}) = m(\text{зразка}) \cdot (1 - p) \quad (1.2)$$

Пояснення до формули (1.2). Загальна маса технічного продукту складається з чистої речовини та домішок. Отримане значення допомагає перевірити початковий баланс: маса CaCO_3 плюс маса домішок має дорівнювати масі зразка.

$$n(\text{CaCO}_3) = m(\text{чист.}) / M(\text{CaCO}_3) \quad (1.3)$$

Пояснення до формули (1.3). Кількість речовини n обчислюємо, поділивши масу чистого CaCO_3 на його молярну масу M. Одиниці г/(г/моль) скорочуються до молів; саме в молях зручно застосовувати коефіцієнти рівняння реакції.

$$m(\text{HCl})_{\text{теор}} = 2 \cdot n(\text{CaCO}_3) \cdot M(\text{HCl}) \quad (1.4)$$

Пояснення до формули (1.4). Коефіцієнт 2 походить із рівняння $\text{CaCO}_3 + 2\text{HCl} \rightarrow \text{CaCl}_2 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$: на один моль карбонату потрібно два моля кислоти. Тут ще немає надлишку й води з кислотного розчину.

$$m(\text{HCl})_{\text{подано}} = m(\text{HCl})_{\text{теор}} \cdot (1 + \delta) \quad (1.5)$$

Пояснення до формули (1.5). Надлишок δ додаємо до стехіометричної потреби в чистій HCl ; наприклад, $\delta = 0,10$ означає подачу на 10 % більше кислоти. Надлишок не означає, що за цієї моделі розкладеться більше карбонату, якщо він повністю прореагував.

$$m(\text{розчину HCl}) = m(\text{HCl})_{\text{подано}} / w(\text{HCl}) \quad (1.6)$$

Пояснення до формули (1.6). Робоча кислота є розчином, тому її загальна маса більша за масу чистої HCl . Ділимо масу поданої кислоти на масову частку w ; різниця між масою розчину й чистої кислоти дає масу води в ньому.

$$V(\text{CO}_2)_{\text{теор}} = n(\text{CaCO}_3) \cdot V_m \quad (1.7)$$

Пояснення до формули (1.7). Із реакції випливає співвідношення $n(\text{CO}_2) = n(\text{CaCO}_3)$. Множимо мольну кількість на молярний об'єм $V_m = 22,4$ л/моль тільки для нормальних умов; результат — теоретичний об'єм газу.

$$V(\text{CO}_2)_{\text{зібрано}} = V(\text{CO}_2)_{\text{теор}} \cdot \eta_{\text{газ}} \quad (1.8)$$

Пояснення до формули (1.8). Якщо газ уловлюється не повністю, коефіцієнт $\eta_{\text{газ}}$ показує частку реально зібраного CO_2 . Це фізичне уловлювання після реакції: $\eta_{\text{газ}}$ не змінює стехіометричну масу утвореного газу.

$$m(\text{CaCl}_2)_{\text{факт}} = n(\text{CaCO}_3) \cdot M(\text{CaCl}_2) \cdot \eta_{\text{сіль}} \quad (1.9)$$

Пояснення до формули (1.9). Маса CaCl_2 походить з кількості карбонату за співвідношенням 1:1. Коефіцієнт $\eta_{\text{сіль}}$ враховує втрати саме під час вилучення солі; він не застосовується до витрати HCl або об'єму газу.

$$m(\text{HCl})_{\text{зал}} = m(\text{HCl})_{\text{подано}} - m(\text{HCl})_{\text{теор}} \quad (1.10)$$

Пояснення до формули (1.10). Після повного перетворення карбонату невитраченою залишається лише подана понад теоретичну потребу HCl . Віднімаємо теоретичну витрату від фактично поданої чистої кислоти, а не від маси її водного розчину.

$$m(\text{NaOH}) = m(\text{HCl})_{\text{зал}} \cdot M(\text{NaOH}) / M(\text{HCl}) \quad (1.11)$$

Пояснення до формули (1.11). За реакцією $\text{HCl} + \text{NaOH} \rightarrow \text{NaCl} + \text{H}_2\text{O}$ молярне співвідношення 1:1. Переводимо залишок HCl у молях, а потім — у масу чистої NaOH через співвідношення молярних мас.

$$m(\text{розчину NaOH}) = m(\text{NaOH}) / w(\text{NaOH}) \quad (1.12)$$

Пояснення до формули (1.12). Щоб дістати масу розчину лугу, масу чистої NaOH ділимо на її масову частку. Перед підстановкою відсотки переведіть у частку одиниці; розчин нейтралізатора не можна плутати з чистим лугом.

Позначення часток p , w , η , α , f , δ у формулах: значення в одиницях, а не у відсотках. Кожна формула наведена окремим рядком; нумерація діє в межах практичної роботи.

4. Організація обчислень та розв'язаний приклад

Повністю розібраний зразок

Наведені нижче ключові кроки демонструють спосіб підстановки чисел і роботи з одиницями. Під час виконання власного варіанта розгорніть їх у всі кроки блоків А–В: для кожного проміжного результату запишіть, звідки він отриманий і в якому наступному обчисленні використовується.

Вихідні дані прикладу: m зразка, г = 60; p , % = 92; HCl , % = 12; надл., % = 10; вил. солі, % = 88; збір газу, % = 90; k партії 2 = 1,25; $NaOH$, % = 10.

- $m(CaCO_3, \text{чист.}) = 60,00 \cdot 0,92 = 55,20 \text{ г}$
- $n(CaCO_3) = 55,20 / 100,09 = 0,5515 \text{ моль}$
- $m(HCl)_{\text{теор}} = 2 \cdot 0,5515 \cdot 36,46 = 40,22 \text{ г}$
- $m(p\text{-ну } HCl) = 40,22 \cdot (1+0,10)/0,12 = 368,64 \text{ г}$
- $V(CO_2)_{\text{зібрано}} = 0,5515 \cdot 22,4 \cdot 0,90 = 11,12 \text{ л}$
- $m(NaOH) = 4,02 \cdot 40/36,46 = 4,41 \text{ г}$
- $m(p\text{-ну } HCl \text{ на } 2 \text{ партії}) = 368,64 \cdot (1+1,25) = 829,45 \text{ г}$

Перевірочний підсумок повного прикладу

Величина	Значення	Величина	Значення
чиста маса $CaCO_3$, г	55,200	інертні домішки, г	4,800
$n(CaCO_3)$, моль	0,5515	HCl теоретично, г	40,216
HCl подано, г	44,237	розчин HCl , г	368,643
вода у розчині, г	324,406	CO_2 теоретично, г	24,272
CO_2 теоретично, л	12,354	CO_2 зібрано, л	11,118
$CaCl_2$ теоретично, г	61,206	$CaCl_2$ виділено, г	53,861
HCl у надлишку, г	4,022	$NaOH$ для нейтралізації, г	4,412
розчин $NaOH$, г	44,120	зразок 2, г	75,000
розчин HCl 2, г	460,804	CO_2 зібрано 2, л	13,898
розчин HCl на дві партії, г	829,448	CO_2 зібрано разом, л	25,016

5. СПІЛЬНІ ЗАВДАННЯ ДЛЯ ВСІХ 30 СТУДЕНТІВ

Обов'язково: блок А — повний наскрізний розрахунок за особистими числовими даними; блок Б — перерахунок або друга взаємопов'язана виробнича ситуація; блок В — перевірки, які треба вписати до звіту.

А. Основний комплексний розрахунок

- Визначити чисту масу $CaCO_3$ та інертні домішки.
- Записати рівняння реакції та розрахувати кількість речовини $CaCO_3$.
- Обчислити теоретичну масу чистої HCl .

4. Врахувати заданий надлишок і визначити масу фактично поданої HCl.
5. Перейти від чистої HCl до маси розчину та маси води в ньому.
6. Знайти теоретичні маси CaCl₂ й CO₂.
7. Знайти теоретичний об'єм CO₂ за н. у. та об'єм фізично зібраного газу.
8. Визначити масу фактично вилученої солі.
9. Розрахувати невитрачену HCl і потребу в чистій NaOH.
10. Визначити масу робочого розчину NaOH для нейтралізації.

Б. Зміна початкової ситуації

1. Для другої партії, маса якої в k разів більша, знайти чисту масу карбонату та витрату кислого розчину.
2. Обчислити об'єм газу, зібраного з другої партії, і сумарний об'єм з обох партій.
3. Знайти сумарну потребу в розчині HCl на обидві партії.
4. Порівняти витрати кислоти на 1 г чистого карбонату в обох партіях: пояснити, чому питома величина незмінна.

В. Обов'язкові перевірки та висновок

1. Перевірити рівність $n(\text{HCl})_{\text{теор}} = 2n(\text{CaCO}_3)$.
2. Пояснити, чому коефіцієнт вилучення CaCl₂ не можна множити на об'єм CO₂.

30 індивідуальних варіантів вихідних даних

Знайдіть у кожній із таблиць рядок зі своїм номером у журналі. Усі частки, наведені у %, перед підстановкою в формули поділіть на 100. Таблиці з однаковим номером рядка становлять ЄДИНИЙ набір даних.

Дані — частина 1 із 2

№	m зразка, г	p, %	HCl, %	надл., %	вил. солі, %
1	48	82	8	5	76
2	55	89	11	9	81
3	62	96	14	13	86
4	69	86	8	6	91
5	64	93	11	10	78
6	71	83	14	14	83
7	78	90	8	7	88
8	85	97	11	11	93
9	80	87	14	15	80
10	87	94	8	8	85
11	94	84	11	12	90
12	101	91	14	5	77
13	96	98	8	9	82
14	103	88	11	13	87
15	110	95	14	6	92
16	117	85	8	10	79

№	m зразка, г	p, %	HCl, %	надл., %	вил. солі, %
17	112	92	11	14	84
18	119	82	14	7	89
19	126	89	8	11	76
20	133	96	11	15	81
21	128	86	14	8	86
22	135	93	8	12	91
23	142	83	11	5	78
24	149	90	14	9	83
25	144	97	8	13	88
26	151	87	11	6	93
27	158	94	14	10	80
28	165	84	8	14	85
29	160	91	11	7	90
30	167	98	14	11	77

Дані — частина 2 із 2

№	збір газу, %	k партії 2	NaOH, %
1	78	1,20	8
2	85	1,27	11
3	92	1,34	14
4	81	1,41	9
5	88	1,48	12
6	95	1,24	15
7	84	1,31	10
8	91	1,38	13
9	80	1,45	8
10	87	1,21	11
11	94	1,28	14
12	83	1,35	9
13	90	1,42	12
14	79	1,49	15
15	86	1,25	10
16	93	1,32	13
17	82	1,39	8
18	89	1,46	11
19	78	1,22	14
20	85	1,29	9
21	92	1,36	12
22	81	1,43	15
23	88	1,50	10
24	95	1,26	13
25	84	1,33	8
26	91	1,40	11

№	збір газу, %	k партії 2	NaOH, %
27	80	1,47	14
28	87	1,23	9
29	94	1,30	12
30	83	1,37	15

6. Таблиця результатів для звіту

Перепишіть цю таблицю в зошит або доповніть у Word. Результати А і Б подавайте окремо; одиниці вимірювання не пропускайте.

Контрольна величина	Мій результат	Одиниця / коментар
чиста маса CaCO_3 , г	_____	_____
розчин HCl , г	_____	_____
CO_2 зібрано, л	_____	_____
CaCl_2 виділено, г	_____	_____
розчин NaOH , г	_____	_____
розчин HCl на дві партії, г	_____	_____

7. Типові помилки та правила перевірки

- Не переводити відсотки в частки одиниці перед підстановкою у формули.
- Плутати масу чистої речовини з масою розчину або суміші; двічі враховувати втрати чи надлишок.
- Перемножувати величини з різними одиницями без переведення ($\text{мл} \leftrightarrow \text{л}$; $\text{г} \leftrightarrow \text{кг}$; $\text{хв} \leftrightarrow \text{с}$; $\text{м}^2 \leftrightarrow \text{см}^2$).
- Не перевіряти матеріальний баланс або пропускати перевірку кінцевого результату підстановкою у вихідну формулу.

8. Контрольні питання і висновок

- Чим різняться надлишок реагенту та практичний вихід продукту?
- Чому масу 12%-го розчину HCl не можна підставляти в рівняння замість маси чистої кислоти?
- Яке співвідношення кількостей речовин HCl і NaOH впливає з нейтралізації?

Шаблон висновку: «За варіантом № __ встановлено ..., розраховано ..., перевірено Найбільше на результат впливає Наведений розрахунок виконаний для навчальної моделі та не є виробничим нормативом».

Опорні джерела: [1, розд. 1, 4; 2, розд. «Стехіометричні закони»; 4]

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 2

Розрахунок складу технологічних розчинів і кислотно-основної обробки: розведення, рН та нейтралізація

Тривалість	Зв'язок із курсом	Рівень
90 хвилин	Теми 4–5	Фаховий молодший бакалавр

Мета:

Поєднати розведення концентрованого розчину, перерахунок масової частки в молярність, двоступеневе розведення, обчислення рН і матеріальний баланс нейтралізації.

Єдина виробнича/навчальна ситуація. НАВЧАЛЬНА МОДЕЛЬ. Готують партію водного розчину HCl із концентрату; густина отриманого розчину задана. Відбирають пробу і розводять її до певного об'єму. Визначають рН розведеної сильної кислоти. Частину цієї проби нейтралізують розчином NaOH з відомими масовою часткою та густиною, а потім розглядають 10%-й надлишок лугу. Розрахунки ідеалізовані, без поправок на активності. Зв'язок із будівництвом: розрахунок концентрації, рН і нейтралізації використовують для розуміння поведінки водних технологічних середовищ і підготовки до аналізу агресивної води; приготування таких розчинів тут не виконується.

1. Теоретичні відомості

Масова частка показує відношення маси розчиненої речовини до маси всього розчину. Під час розведення чиста маса розчиненої речовини не змінюється: з концентрату її лише переносять у більший об'єм води. Тому спочатку визначають масу чистої HCl у цільовій партії, потім масу концентрату та доданої води.

Густина допомагає перейти від маси розчину до його об'єму. Для обчислення молярної концентрації слід перейти від грамів HCl до молів та поділити на об'єм розчину в літрах. Масову частку у відсотках у формули не підставляють без перетворення.

Після відбирання аліквоти кількість кислоти, що перейшла до мірної колби, залишається тією самою. Під час другого розведення змінюється тільки її концентрація. Цю саму залежність використовують для приготування стандартних розбавлених кислотних розчинів.

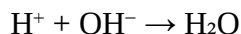
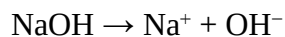
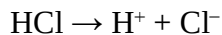
У межах спрощеної навчальної моделі сильна одноосновна кислота HCl дисоціює повністю. Вважають, що молярна концентрація гідроген-іонів дорівнює молярній концентрації розведеної HCl. Звідси $\text{pH} = -\lg[\text{H}^+]$. Це наближення не слід без перевірки застосовувати до дуже концентрованих розчинів.

Реакція HCl і NaOH відбувається у молярному співвідношенні 1:1. Стехіометричний об'єм лужного розчину знаходять послідовно через кількість речовини кислоти, масу чистої NaOH, масу розчину й густина. При 10%-му надлишку лугу додають на 10% більше NaOH, ніж потрібно для нейтралізації.

Якщо потрібно оцінити рН після введення надлишкового лугу, знаходять молі зайвих OH^- і ділять на суму об'ємів кислотної проби та доданого лужного розчину. У цій навчальній моделі припускають адитивність об'ємів, температуру 25 °C і $\text{pH} + \text{pOH} = 14$.

Для самоконтролю використовуйте два незалежні баланси: збереження маси HCl під час приготування та розведення, а також рівність кількостей HCl і NaOH у точці еквівалентності.

2. Хімічні рівняння та припущення



Маси — г; об'єми — мл (у концентраційних формулах перетворити в літри); густини — г/мл; С — моль/л; $M(\text{HCl})=36,46$; $M(\text{NaOH})=40,00$ г/моль; для рН у цій задачі $t=25\text{ }^\circ\text{C}$.

3. Формули для самостійного розрахунку

Як читати та застосовувати формули. Порядок роботи з формулами: збережіть масу HCl під час розведення, після цього використайте густину для переходу до об'єму. Молярна концентрація стосується лише об'єму відповідного розчину. Для рН беріть концентрацію після розведення, а для нейтралізації — кількість речовини саме у відібраній пробі.

$$m(\text{HCl}) = m(\text{готового розчину}) \cdot w_{\text{ціль}} \quad (2.1)$$

Пояснення до формули (2.1). Мета — встановити, скільки чистої HCl повинно міститися в готовому робочому розчині. Пам'ятайте: цільова масова частка належить кінцевому розчину, а не вихідному концентрату.

$$m(\text{концентрату}) = m(\text{HCl}) / w_{\text{конц}} \quad (2.2)$$

Пояснення до формули (2.2). У концентраті тільки частка $w_{\text{конц}}$ маси припадає на HCl. Тому для отримання вже знайденої маси чистої кислоти її треба поділити на вміст HCl у концентраті.

$$m(\text{води}) = m(\text{готового розчину}) - m(\text{концентрату}) \quad (2.3)$$

Пояснення до формули (2.3). Під час розведення додають тільки воду, масу HCl вважають незмінною. Маса води — різниця між заданою масою готового розчину та розрахованою масою концентрату.

$$V(\text{готового розчину}) = m(\text{готового розчину}) / \rho \quad (2.4)$$

Пояснення до формули (2.4). Густина ρ пов'язує масу і об'єм. Узгодьте одиниці: за маси в грамах і густини г/мл об'єм одержите в мілілітрах; для молярної концентрації далі потрібні літри.

$$C_0 = (m(\text{HCl})/M(\text{HCl})) / V_{\text{готового(л)}} \quad (2.5)$$

Пояснення до формули (2.5). Молярність — кількість молів HCl у літрі готового розчину. Спочатку переведіть грами HCl у молі, потім поділіть на об'єм саме готового розчину в літрах.

$$C_1 = C_0 \cdot V_{\text{аліквоти}} / V_{\text{колби}} \quad (2.6)$$

Пояснення до формули (2.6). Під час розведення аліквоти молі кислоти зберігаються: $C_0 V_{\text{аліквоти}} = C_1 V_{\text{колби}}$. Обидва об'єми беріть в однакових одиницях; більший кінцевий об'єм означає меншу концентрацію.

$$\text{pH} = -\lg C_1 \quad (2.7)$$

Пояснення до формули (2.7). Для сильної одноосновної кислоти HCl в цій навчальній моделі $[\text{H}^+] \approx C_1$. Тоді рН є від'ємним десятковим логарифмом числового значення концентрації в моль/л.

$$n(\text{HCl у пробі}) = C_1 \cdot V_{\text{проби}}(\text{л}) \quad (2.8)$$

Пояснення до формули (2.8). Моляри кислоти в окремій пробі дорівнюють концентрації, помноженій на об'єм проби в літрах. Не підставляйте об'єм всієї колби, якщо на нейтралізацію відібрана лише частина.

$$m(\text{NaOH}) = n(\text{HCl}) \cdot M(\text{NaOH}) \quad (2.9)$$

Пояснення до формули (2.9). За рівнянням $\text{HCl} + \text{NaOH}$ співвідношення молей 1:1: скільки молей HCl у пробі, стільки молей чистої NaOH потрібно. Молярну масу лугу використовуйте після визначення молей.

$$V(\text{NaOH}) = m(\text{NaOH}) / (w_{\text{NaOH}} \cdot \rho_{\text{NaOH}}) \quad (2.10)$$

Пояснення до формули (2.10). Густина і масова частка лужного розчину дають масу NaOH в одиниці об'єму. Якщо ρ взято у г/мл, то результат виходить у мл; відстежуйте одиниці при змішуванні.

$$[\text{OH}^-]_{\text{надл}} = 0,10 \cdot n(\text{HCl}) / (V_{\text{проби}} + 1,10 \cdot V_{\text{NaOH}}) \quad (2.11)$$

Пояснення до формули (2.11). Для моделі 10%-го надлишку спочатку знайдіть надлишкові моля OH^- , а потім поділіть їх на сумарний об'єм проби і доданого розчину. В обох складових знаменника потрібні літри.

$$\text{pH}_{\text{надл}} = 14 + \lg[\text{OH}^-]_{\text{надл}} \quad (2.12)$$

Пояснення до формули (2.12). За 25 °С у спрощеній моделі $\text{pH} + \text{pOH} = 14$. Підставляємо знайдену концентрацію надлишкових OH^- ; результат має відповідати лужному середовищу ($\text{pH} > 7$).

Позначення часток ρ , w , η , α , f , δ у формулах: значення в одиницях, а не у відсотках. Кожна формула наведена окремим рядком; нумерація діє в межах практичної роботи.

4. Організація обчислень та розв'язаний приклад

Повністю розібраний зразок

Наведені нижче ключові кроки демонструють спосіб підстановки чисел і роботи з одиницями. Під час виконання власного варіанта розгорніть їх у всі кроки блоків А–В: для кожного проміжного результату запишіть, звідки він отриманий і в якому наступному обчисленні використовується.

Вихідні дані прикладу: готовий р-н, $\gamma = 500$; конц. HCl , % = 20; роб. HCl , % = 5; ρ_{HCl} , г/мл = 1,030; аліквота, мл = 10; колба, мл = 250; проба, мл = 60; NaOH , % = 8; ρ_{NaOH} , г/мл = 1,06.

1. $m(\text{HCl}) = 500,00 \cdot 0,05 = 25,00 \text{ г}$
2. $m(\text{концентрату}) = 25,00 / 0,20 = 125,00 \text{ г}$
3. $V(\text{робочого}) = 500,00 / 1,03 = 485,44 \text{ мл}$
4. $C_0 = (25,00 / 36,46) / (485,44 / 1000) = 1,413 \text{ моль/л}$
5. $C_1 = 1,413 \cdot 10 / 250 = 0,0565 \text{ моль/л}$
6. $\text{pH} = -\lg(0,0565) = 1,248$
7. $V(\text{NaOH}) = 0,1356 / (0,08 \cdot 1,06) = 1,599 \text{ мл}$

Перевірочний підсумок повного прикладу

Величина	Значення	Величина	Значення
концентрат HCl, г	125,000	вода для розведення, г	375,000
готовий розчин, мл	485,437	n(HCl) у партії, моль	0,6857
C(HCl) вихідного, моль/л	1,413	C після 2-го розведення, моль/л	0,0565
pH після розведення	1,248	n(HCl) у пробі, моль	0,0034
NaOH чистий, г	0,1356	розчин NaOH, г	1,695
розчин NaOH, мл	1,599	розчин NaOH +10%, мл	1,759
[OH ⁻] після +10%, моль/л	0,0055	pH після +10% NaOH	11,740
NaOH для двох проб, г	0,2712	розчин NaOH для двох проб, мл	3,198

5. СПІЛЬНІ ЗАВДАННЯ ДЛЯ ВСІХ 30 СТУДЕНТІВ

Обов'язково: блок А — повний наскрізний розрахунок за особистими числовими даними; блок Б — перерахунок або друга взаємопов'язана виробнича ситуація; блок В — перевірки, які треба вписати до звіту.

А. Основний комплексний розрахунок

1. Обчислити масу чистої HCl у заданій партії робочого розчину.
2. Визначити масу концентрату та масу доданої води.
3. Знайти об'єм готового розчину за його густиною.
4. Обчислити молярну концентрацію приготовленої HCl.
5. Знайти кількість HCl у відібраній аліквоті.
6. Визначити концентрацію після розведення у мірній колбі.
7. Обчислити pH нового розведеного розчину.
8. Для заданої проби знайти кількість HCl і чисту масу NaOH.
9. Перерахувати масу NaOH на масу й об'єм робочого лужного розчину.
10. Обчислити об'єм луку для 10%-го надлишку, концентрацію надлишкового OH⁻ та pH суміші.

Б. Зміна початкової ситуації

1. Для другої однакової кислотної проби визначити додаткову потребу в чистій NaOH.
2. Розрахувати об'єм розчину NaOH, необхідний для двох проб за стехіометричних умов.
3. Скласти короткий баланс: скільки чистої HCl було спочатку та скільки її перейшло у відібрану аліквоту.

В. Обов'язкові перевірки та висновок

1. Перевірити сталість добутку C·V під час другого розведення.

2. Пояснити, чому рН розчину з 10%-м надлишком NaOH не дорівнює 7.

30 індивідуальних варіантів вихідних даних

Знайдіть у кожній із таблиць рядок зі своїм номером у журналі. Усі частки, наведені у %, перед підстановкою в формули поділіть на 100. Таблиці з однаковим номером рядка становлять ЄДИНИЙ набір даних.

Дані — частина 1 із 2

№	готовий р-н, г	конц. HCl, %	роб. HCl, %	ρHCl, г/мл	аліквота, мл
1	300	20	3	1,010	5
2	325	25	5	1,018	10
3	350	30	7	1,026	15
4	375	20	4	1,034	20
5	400	25	6	1,042	5
6	425	30	3	1,050	10
7	450	20	5	1,010	15
8	475	25	7	1,018	20
9	500	30	4	1,026	5
10	525	20	6	1,034	10
11	550	25	3	1,042	15
12	575	30	5	1,050	20
13	600	20	7	1,010	5
14	625	25	4	1,018	10
15	650	30	6	1,026	15
16	675	20	3	1,034	20
17	700	25	5	1,042	5
18	725	30	7	1,050	10
19	750	20	4	1,010	15
20	775	25	6	1,018	20
21	800	30	3	1,026	5
22	825	20	5	1,034	10
23	850	25	7	1,042	15
24	875	30	4	1,050	20
25	900	20	6	1,010	5
26	925	25	3	1,018	10
27	950	30	5	1,026	15
28	975	20	7	1,034	20
29	1 000	25	4	1,042	5
30	1 025	30	6	1,050	10

Дані — частина 2 із 2

№	колба, мл	проба, мл	NaOH, %	ρNaOH, г/мл
1	250	40	5	1,03
2	375	60	6	1,04
3	500	80	7	1,05
4	250	100	8	1,06
5	375	120	9	1,07
6	500	40	5	1,03
7	250	60	6	1,04
8	375	80	7	1,05
9	500	100	8	1,06
10	250	120	9	1,07
11	375	40	5	1,03
12	500	60	6	1,04
13	250	80	7	1,05
14	375	100	8	1,06
15	500	120	9	1,07
16	250	40	5	1,03
17	375	60	6	1,04
18	500	80	7	1,05
19	250	100	8	1,06
20	375	120	9	1,07
21	500	40	5	1,03
22	250	60	6	1,04
23	375	80	7	1,05
24	500	100	8	1,06
25	250	120	9	1,07
26	375	40	5	1,03
27	500	60	6	1,04
28	250	80	7	1,05
29	375	100	8	1,06
30	500	120	9	1,07

6. Таблиця результатів для звіту

Перепишіть цю таблицю в зошит або доповніть у Word. Результати А і Б подавайте окремо; одиниці вимірювання не пропускайте.

Контрольна величина	Мій результат	Одиниця / коментар
концентрат HCl, г	_____	_____
вода для розведення, г	_____	_____
С після 2-го розведення, моль/л	_____	_____
рН після розведення	_____	_____
розчин NaOH, мл	_____	_____

Контрольна величина	Мій результат	Одиниця / коментар
pH після +10% NaOH	_____	_____

7. Типові помилки та правила перевірки

- Не переводити відсотки в частки одиниці перед підстановкою у формули.
- Плутати масу чистої речовини з масою розчину або суміші; двічі враховувати втрати чи надлишок.
- Перемножувати величини з різними одиницями без переведення (мл ↔ л; г ↔ кг; хв ↔ с; м² ↔ см²).
- Не перевіряти матеріальний баланс або пропускати перевірку кінцевого результату підстановкою у вихідну формулу.

8. Контрольні питання і висновки

- Чому при розведенні масова частка зменшується, а маса HCl не змінюється?
- У яких випадках припущення $[H^+] \approx C(HCl)$ є наближенням?
- Що означає точка еквівалентності реакції нейтралізації?

Шаблон висновку: «За варіантом № __ встановлено ..., розраховано ..., перевірено Найбільше на результат впливає Наведений розрахунок виконаний для навчальної моделі та не є виробничим нормативом».

Опорні джерела: [1, розд. 6; 2, розд. «Розчини»; 3, розд. 8–9]

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 3

Кількісний аналіз окисно-відновних перетворень металів та електролітичного осадження покриттів

Мета:

Навчитися знаходити лімітуючий реагент в ОВР і поєднувати стехіометричний розрахунок з електролітичним осадженням за законом Фарадея.

Єдина виробнича/навчальна ситуація. НАВЧАЛЬНА МОДЕЛЬ. У посудині відбувається реакція технічного Zn з водним розчином CuSO₄. Реагенти можуть бути взяті у нестехіометричному співвідношенні. Після цього окрему сталеву пластину електролітично вкривають міддю з розчину CuSO₄. Обидва процеси порівнюють за кількістю осадженої міді, але не вважають їх одним технологічним циклом. Зв'язок із будівництвом: окисно-відновні співвідношення та металеві покриття формують базу для наступних задач із корозії арматури і захисту сталевих конструкцій.

1. Теоретичні відомості

Окиснення супроводжується віддаванням електронів, а відновлення — їх прийманням. У реакції Zn з Cu²⁺ цинк виступає відновником, а йони купруму — окисником. Складання електронного балансу дозволяє підтвердити коефіцієнти рівняння.

Для обчислення виходу продукту з двох заданих реагентів необхідно встановити, якого з них замало. Спочатку обчислюють кількість молів чистого Zn та CuSO₄, а потім порівнюють їх з урахуванням співвідношення 1:1. Менша кількість задає максимально можливий перебіг реакції.

Не можна вважати, що обидва реагенти обов'язково витрачаються повністю. Залишок реагенту знаходять як різницю між початковою кількістю та тією, що вступила в реакцію. Маса осадженої міді та маса ZnSO₄ обчислюються зі спільного кількісного показника перебігу.

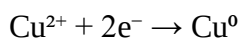
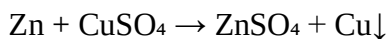
Електролітичне осадження відрізняється від хімічного заміщення тим, що відновлення іонів Cu²⁺ забезпечується електричним струмом. Кількість електрики, яка пройшла через електролізер, дорівнює добутку сили струму на час у секундах.

Закон Фарадея пов'язує заряд із кількістю молів електронів. Для осадження одного моля Cu²⁺ потрібно два молі електронів. Якщо вихід за струмом менший за 100%, на утворення металу припадає лише відповідна частина пропущеного заряду.

За масою осадженої міді, густиною металу і відомою площею можна знайти умовну рівномірну товщину покриття. Це геометрична навчальна модель без врахування крайових ефектів і неоднорідності густини струму. За бажаною товщиною можна провести зворотний розрахунок потрібного часу.

Порівняння двох способів отримання міді в цій роботі слугує перевіркою матеріального та електронного балансів, а не оцінкою переваг конкретних промислових технологій.

2. Хімічні рівняння та припущення



$M(\text{Zn})=65,38$; $M(\text{CuSO}_4)=159,61$; $M(\text{ZnSO}_4)=161,45$; $M(\text{Cu})=63,55$ г/моль; $F=96\,485$ Кл/моль; $\rho_{\text{Cu}}=8,96$ г/см³; $1\text{ м}^2=10\,000\text{ см}^2$; t у законі Фарадея — секунди.

3. Формули для самостійного розрахунку

Як читати та застосовувати формули. Порядок роботи з формулами: у хімічній реакції спершу встановіть лімітуючий реагент; в електролізі окремо встановіть заряд і вихід за струмом. Осаджена хімічним способом і електролітично мідь належать до різних етапів. Для товщини шару обов'язково зведіть масу, густину і площу до сумісних одиниць.

$$n(\text{Zn}) = m(\text{Zn техн.}) \cdot p / M(\text{Zn}) \quad (3.1)$$

Пояснення до формули (3.1). Оскільки технічний цинк містить домішки, на реакцію може піти тільки його чиста частина. Масу чистого Zn ділимо на молярну масу: це перший із двох запасів реагентів, які треба порівняти.

$$n(\text{CuSO}_4) = m(\text{розчину}) \cdot w / M(\text{CuSO}_4) \quad (3.2)$$

Пояснення до формули (3.2). Маса розчину CuSO_4 — не маса чистої солі. Помножте на її масову частку, після чого знайдіть молі CuSO_4 ; використовуйте саме задану форму солі в умові.

$$n(\text{реакції}) = \min[n(\text{Zn}); n(\text{CuSO}_4)] \quad (3.3)$$

Пояснення до формули (3.3). За реакцією $\text{Zn} + \text{CuSO}_4 \rightarrow \text{ZnSO}_4 + \text{Cu}$ реагенти взаємодіють у співвідношенні 1:1. Менша з двох наявних кількостей задає масштаб реакції — це лімітуючий реагент.

$$m(\text{Cu})_{\text{хім}} = n(\text{реакції}) \cdot M(\text{Cu}) \quad (3.4)$$

Пояснення до формули (3.4). Один моль реагенту в масштабі реакції утворює один моль Cu. Помноживши молі реакції на молярну масу міді, одержимо теоретичну масу хімічно виділеної міді.

$$m(\text{залишок}) = [n(\text{початкова}) - n(\text{реакції})] \cdot M \quad (3.5)$$

Пояснення до формули (3.5). Залишок обчислюємо тільки для реагенту, який був у надлишку: від початкової кількості віднімаємо витрачену. Не допускайте від'ємної кількості; для лімітуючого реагенту залишок дорівнює нулю.

$$Q = I \cdot t \cdot 60 \quad (3.6)$$

Пояснення до формули (3.6). Електричний заряд Q визначається як сила струму, помножена на час у секундах. Якщо тривалість задана в хвилинах, множник 60 обов'язковий; кулон = ампер·секунда.

$$m(\text{Cu})_{\text{ел}} = Q \cdot \eta \cdot M(\text{Cu}) / (2F) \quad (3.7)$$

Пояснення до формули (3.7). Для осадження Cu^{2+} потрібні два електрони на атом Cu; тому у законі Фарадея в знаменнику $2F$. η урахує вихід за струмом: не весь заряд обов'язково витрачається на виділення металу.

$$\delta(\text{мм}) = 10m(\text{Cu}) / (\rho_{\text{Cu}} \cdot S \text{см}^2) \quad (3.8)$$

Пояснення до формули (3.8). Об'єм мідного шару — це його маса, поділена на густину. Далі об'єм поділіть на площу S у см², а сантиметри переведіть у міліметри множником 10.

$$m(\text{Cu})_{\text{ціль}} = \rho_{\text{Cu}} \cdot S \text{см}^2 \cdot \delta_{\text{ціль}}(\text{см}) \quad (3.9)$$

Пояснення до формули (3.9). Щоб наперед задати товщину шару, спочатку знайдіть потрібний об'єм $S \cdot \delta$ (δ виразіть у сантиметрах), а через густину — потрібну масу міді. Не змішуйте мм та см.

$$\text{ті́ль} = 2F \cdot m(\text{Cu})_{\text{ті́ль}} / [I \cdot \eta \cdot M(\text{Cu}) \cdot 60] \quad (3.10)$$

Пояснення до формули (3.10). Обертайте закон Фарадея у зворотний бік: за цільовою масою Cu знайдіть час, необхідний за заданих сили струму і виходу за струмом. Множник 60 переводить секунди у хвилини.

Позначення часток p , w , η , α , f , δ у формулах: значення в одиницях, а не у відсотках. Кожна формула наведена окремим рядком; нумерація діє в межах практичної роботи.

4. Організація обчислень та розв'язаний приклад

Повністю розібраний зразок

Наведені нижче ключові кроки демонструють спосіб підстановки чисел і роботи з одиницями. Під час виконання власного варіанта розгорніть їх у всі кроки блоків А–В: для кожного проміжного результату запишіть, звідки він отриманий і в якому наступному обчисленні використовується.

Вихідні дані прикладу: Zn техн., $\gamma = 70$; чистота, $\% = 95$; розчин CuSO_4 , $\gamma = 800$; CuSO_4 , $\% = 10$; струм, $A = 5$; час, $\text{хв} = 40$; $\eta_{\text{струму}}$, $\% = 90$; площа, $\text{м}^2 = 0,020$; $\delta_{\text{ті́ль}}$, $\text{мкм} = 25$; η_2 , $\% = 95$.

1. $m(\text{Zn чист.}) = 70,0 \cdot 0,95 = 66,50 \text{ г}$
2. $n(\text{Zn}) = 66,50 / 65,38 = 1,0171 \text{ моль}$
3. $n(\text{CuSO}_4) = 80,00 / 159,61 = 0,5012 \text{ моль}$
4. $n(\text{реакції}) = \min(1,0171; 0,5012) = 0,5012 \text{ моль}$
5. $m(\text{Cu}) = 0,5012 \cdot 63,55 = 31,85 \text{ г}$
6. $Q = 5 \cdot 40 \cdot 60 = 12\,000 \text{ Кл}$
7. $m(\text{Cu})_{\text{ел}} = Q \cdot 0,90 \cdot 63,55 / (2 \cdot 96485) = 3,557 \text{ г}$

Перевірочний підсумок повного прикладу

Величина	Значення	Величина	Значення
Zn чистий, г	66,500	$n(\text{Zn})$, моль	1,017
CuSO_4 чистий, г	80,000	$n(\text{CuSO}_4)$, моль	0,5012
n реакції, моль	0,5012	Cu виділиться (теор.), г	31,853
ZnSO_4 утвориться, г	80,922	залишок Zn, г	33,730
залишок CuSO_4 , г	0,0000	заряд Q , Кл	12 000,000
Cu електроліз, г	3,557	витрачено CuSO_4 , г	8,933
товщина осаду, мкм	19,848	маса Cu заданої товщини, г	4,480
час для заданої товщини, хв	50,384	сумарно Cu (2 процеси), г	35,409
Cu за альтернативного виходу η_2 , г	3,754		

5. СПІЛЬНІ ЗАВДАННЯ ДЛЯ ВСІХ 30 СТУДЕНТІВ

Обов'язково: блок А — повний наскрізний розрахунок за особистими числовими даними; блок Б — перерахунок або друга взаємопов'язана виробнича ситуація; блок В — перевірки, які треба вписати до звіту.

А. Основний комплексний розрахунок

1. Скласти електронний баланс і визначити окисник та відновник.
2. Визначити масу чистого Zn і кількість речовини Zn.
3. Знайти масу та кількість речовини CuSO_4 у розчині.
4. Установити лімітуючий реагент і кількість перебігу реакції.
5. Обчислити теоретичну масу хімічно отриманої міді та масу ZnSO_4 .
6. Розрахувати масові залишки обох вихідних реагентів.
7. Для електролізу знайти пропущений електричний заряд.
8. Обчислити масу Cu, осаджену з урахуванням виходу за струмом.
9. Знайти масу CuSO_4 , витраченого на електроліз, і рівномірну товщину мідного шару.
10. Порівняти масу міді, отриманої хімічною реакцією та електролізом.

Б. Зміна початкової ситуації

1. Для заданої цільової товщини покриття знайти потрібну масу Cu.
2. Визначити тривалість електролізу за незмінних I та η .
3. Припустити інший вихід за струмом η_2 за незмінного заряду Q і обчислити альтернативну масу осадженої Cu.

В. Обов'язкові перевірки та висновок

1. Перевірити, що не може залишитися негативна маса реагенту.
2. Перевірити одиниці Фарадеєвого розрахунку й переведення $\text{м}^2 \rightarrow \text{см}^2$.

30 індивідуальних варіантів вихідних даних

Знайдіть у кожній із таблиць рядок зі своїм номером у журналі. Усі частки, наведені у %, перед підстановкою в формули поділіть на 100. Таблиці з однаковим номером рядка становлять ЄДИНИЙ набір даних.

Дані — частина 1 із 2

№	Zn техн., г	чистота, %	розчин CuSO_4 , г	CuSO_4 , %	струм, А
1	45	85	650	6	3
2	48	90	685	9	4
3	51	95	720	12	5
4	54	86	755	15	6
5	57	91	790	8	7
6	60	96	825	11	8

№	Zn техн., г	чистота, %	розчин CuSO ₄ , г	CuSO ₄ , %	струм, А
7	63	87	860	14	3
8	66	92	895	7	4
9	69	97	930	10	5
10	72	88	965	13	6
11	75	93	1 000	6	7
12	78	98	1 035	9	8
13	81	89	1 070	12	3
14	84	94	1 105	15	4
15	87	85	1 140	8	5
16	90	90	1 175	11	6
17	93	95	1 210	14	7
18	96	86	1 245	7	8
19	99	91	1 280	10	3
20	102	96	1 315	13	4
21	105	87	1 350	6	5
22	108	92	1 385	9	6
23	111	97	1 420	12	7
24	114	88	1 455	15	8
25	117	93	1 490	8	3
26	120	98	1 525	11	4
27	123	89	1 560	14	5
28	126	94	1 595	7	6
29	129	85	1 630	10	7
30	132	90	1 665	13	8

Дані — частина 2 із 2

№	час, хв	ηструму, %	площа, м²	δціль, мкм	η ₂ , %
1	25	80	0,015	12	91
2	30	87	0,018	15	92
3	35	94	0,021	18	93
4	40	86	0,024	21	94
5	45	93	0,027	24	95
6	50	85	0,030	27	96
7	55	92	0,015	30	97
8	25	84	0,018	12	91
9	30	91	0,021	15	92
10	35	83	0,024	18	93
11	40	90	0,027	21	94
12	45	82	0,030	24	95
13	50	89	0,015	27	96
14	55	81	0,018	30	97
15	25	88	0,021	12	91

№	час, хв	η струму, %	площа, м ²	δ ціль, мкм	η_2 , %
16	30	80	0,024	15	92
17	35	87	0,027	18	93
18	40	94	0,030	21	94
19	45	86	0,015	24	95
20	50	93	0,018	27	96
21	55	85	0,021	30	97
22	25	92	0,024	12	91
23	30	84	0,027	15	92
24	35	91	0,030	18	93
25	40	83	0,015	21	94
26	45	90	0,018	24	95
27	50	82	0,021	27	96
28	55	89	0,024	30	97
29	25	81	0,027	12	91
30	30	88	0,030	15	92

6. Таблиця результатів для звіту

Перепишіть цю таблицю в зошит або доповніть у Word. Результати А і Б подавайте окремо; одиниці вимірювання не пропускайте.

Контрольна величина	Мій результат	Одиниця / коментар
Си виділиться (теор.), г	_____	_____
залишок Zn, г	_____	_____
залишок CuSO ₄ , г	_____	_____
Си електроліз, г	_____	_____
товщина осаду, мкм	_____	_____
час для заданої товщини, хв	_____	_____

7. Типові помилки та правила перевірки

- Не переводити відсотки в частки одиниці перед підстановкою у формули.
- Плутати масу чистої речовини з масою розчину або суміші; двічі враховувати втрати чи надлишок.
- Перемножувати величини з різними одиницями без переведення (мл ↔ л; г ↔ кг; хв ↔ с; м² ↔ см²).
- Не перевіряти матеріальний баланс або пропускати перевірку кінцевого результату підстановкою у вихідну формулу.

8. Контрольні питання і висновок

- Чому лімітуючий реагент визначають за кількостями речовин, а не за масами?
- Скільки молів електронів потрібно для осадження одного моля Си?

- Яке припущення дозволяє обчислювати товщину покриття як однакову по всій поверхні?

Шаблон висновку: «За варіантом № ____ встановлено ..., розраховано ..., перевірено Найбільше на результат впливає Наведений розрахунок виконаний для навчальної моделі та не є виробничим нормативом».

Опорні джерела: [1, розд. 7; 2, розд. «Електрохімія»; 4]

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 4

Матеріальний баланс повітряних в'язучих: випалювання вапняку, гашення вапна і твердіння гіпсу

Мета:

Скласти послідовний матеріальний баланс випалювання вапнякової сировини, часткового гашення CaO, гідратації будівельного гіпсу та умовної карбонізації вапняного каменю.

Єдина виробнича/навчальна ситуація. НАВЧАЛЬНА МОДЕЛЬ. Із заданої партії вапняку одержують негашене вапно; частину утвореного CaO гасять. Паралельно готують гіпсове в'язуче, визначаючи стехіометричну потребу у воді для утворення дигідрату. Для готового вапняного матеріалу розглядають часткову карбонізацію. Процеси подано окремими балансами: їхні ступені перетворення не слід ототожнювати.

1. Теоретичні відомості

Природний вапняк містить карбонат кальцію та мінеральні домішки. За нагрівання CaCO_3 розкладається з виділенням CO_2 і утворенням CaO. Для кількісного балансу спочатку визначають масу чистого карбонату, а потім застосовують частку його розкладу. Коефіцієнт розкладу характеризує модель ступеня перетворення, а не норматив випалювання [7, с. 98–107].

Гашення вапна — екзотермічна хімічна взаємодія CaO з водою, внаслідок якої виникає Ca(OH)_2 . Реальна витрата технологічної води може бути значно більшою за стехіометричну через змочування, випаровування та вимоги до консистенції. Розрахована тут маса води є тільки мінімальною кількістю, що вступає у відповідну реакцію [7, с. 102–106].

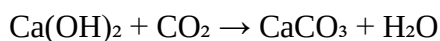
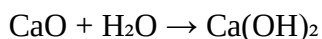
Повітряне твердіння вапняного в'язучого супроводжується, серед іншого, поступовою взаємодією Ca(OH)_2 з CO_2 . Темп карбонізації залежить від вологості, доступу газу та структури; тому частку карбонізованого гідроксиду задано як умову задачі, а не прогноз експлуатаційної швидкості [7, с. 102–106].

Напівводний гіпс $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ під час твердіння приєднує воду і переходить у $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Кристалізація дигідрату формує затверділу структуру. Розрахунок потреби у воді виконуємо лише для чистого напівгідрату, який реально гідратувався; домішки та невідреагована частина не споживають стехіометричної води цієї реакції [7, с. 98–102].

Для кожного етапу перевіряйте власний баланс мас: розклад карбонату → твердий залишок + CO_2 ; гашення $\text{CaO} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2$; гідратація гіпсу → збільшення маси твердої фази на масу зв'язаної води. Змішування цих трьох балансів без розділення стадій призводить до подвійного обліку газу й води.

Виведений показник « CO_2 під час випалювання мінус CO_2 при карбонізації» стосується лише двох указаних реакцій у межах навчального прикладу. Це не повна оцінка вуглецевого сліду виробництва чи життєвого циклу будівлі.

2. Хімічні рівняння та припущення





Маси — кг; p , η , h , α і β — частки одиниці; $M(\text{CaCO}_3)=100,09$; $M(\text{CaO})=56,08$; $M(\text{CO}_2)=44,01$; $M(\text{H}_2\text{O})=18,015$; $M[\text{Ca}(\text{OH})_2]=74,09$; $M(\text{напівгідрату})=145,15$; $M(\text{дигідрату})=172,17$ кг/кмоль. У розрахунках не враховано побічних летких домішок, теплові й механічні втрати.

3. Формули для самостійного розрахунку

Як читати та застосовувати формули. Усі позначення використовують тільки для визначеної тут моделі. Спочатку розрахуйте масу чистих компонентів і стехіометрію; далі — реальні частки перетворення, втрати й об'ємні або поверхневі показники. Не додавайте різномірні величини та не використовуйте навчальний баланс як норму складу матеріалу.

$$m(\text{CaCO}_3) = m(\text{вапняку}) \cdot p \quad (4.1)$$

Пояснення до формули (4.1). p — масова частка CaCO_3 у первинній партії. Лише цей компонент бере участь у рівнянні термічного розкладу.

$$m(\text{домішок}) = m(\text{вапняку}) \cdot (1 - p) \quad (4.2)$$

Пояснення до формули (4.2). Інертний залишок задається різницею; у цій моделі домішки не розкладаються і залишаються у твердій фазі.

$$m(\text{CaCO}_3, \text{розкл.}) = m(\text{CaCO}_3) \cdot \eta \quad (4.3)$$

Пояснення до формули (4.3). η — частка саме чистого карбонату, що розклалася. Нерозкладений карбонат лишається у випаленому продукті.

$$m(\text{CaO}) = m(\text{CaCO}_3, \text{розкл.}) \cdot 56,08 / 100,09 \quad (4.4)$$

Пояснення до формули (4.4). Молярні співвідношення CaCO_3 і CaO дорівнюють 1:1, але маси відрізняються через виділення газу.

$$m(\text{CO}_2, \text{випал.}) = m(\text{CaCO}_3, \text{розкл.}) \cdot 44,01 / 100,09 \quad (4.5)$$

Пояснення до формули (4.5). З кожного моля карбонату утворюється один моль CO_2 ; у моделі газ повністю залишає твердий продукт.

$$m(\text{випаленого залишку}) = m(\text{вапняку}) - m(\text{CO}_2, \text{випал.}) \quad (4.6)$$

Пояснення до формули (4.6). Масовий баланс діє, якщо єдина втрачена маса — CO_2 із карбонату; не переносіть його на промислову піч без уточнень.

$$m(\text{CaO, гаш.}) = m(\text{CaO}) \cdot h \quad (4.7)$$

Пояснення до формули (4.7). h задає частку утвореного CaO , що фактично гідратується. Негашений залишок дорівнює $m(\text{CaO}) \cdot (1-h)$.

$$m(\text{H}_2\text{O, гаш.}) = m(\text{CaO, гаш.}) \cdot 18,015 / 56,08 \quad (4.8)$$

Пояснення до формули (4.8). Вказана вода хімічно витрачається за рівнянням; технологічний надлишок води розраховують окремо.

$$m[\text{Ca}(\text{OH})_2] = m(\text{CaO, гаш.}) \cdot 74,09 / 56,08 \quad (4.9)$$

Пояснення до формули (4.9). Гашення збільшує масу твердої речовини рівно на масу хімічно зв'язаної води.

$$m(\text{гіпсу, чист.}) = m(\text{напівгідрату}) \cdot p_g \quad (4.10)$$

Пояснення до формули (4.10). p_g — частка чистого $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$ у гіпсовому в'язучому; решта залишається інертною в цьому балансі.

$$m(\text{H}_2\text{O, гіпс}) = m(\text{гіпсу, чист.}) \cdot \eta_g \cdot 27,02 / 145,15 \quad (4.11)$$

Пояснення до формули (4.11). На моль напівгідрату приєднується 1,5 моль води; η — частка напівгідрату, що завершила гідратацію.

$$m(\text{гіпсового твердого продукту}) = m(\text{напівгідрату}) + m(\text{H}_2\text{O, гіпс}) \quad (4.12)$$

Пояснення до формули (4.12). Сумарна маса твердої фази містить чисту частку, невідреаговане в'язуче і незмінні домішки.

$$m(\text{CO}_2, \text{ зв'яз.}) = m[\text{Ca}(\text{OH})_2] \cdot \beta \cdot 44,01 / 74,09 \quad (4.13)$$

Пояснення до формули (4.13). β — частка гідроксиду, що карбонізувалася. За відсутності інших карбонізованих фаз молярне співвідношення 1:1.

$$m(\text{CO}_2, \text{ умовний нетто}) = m(\text{CO}_2, \text{ випал.}) - m(\text{CO}_2, \text{ зв'яз.}) \quad (4.14)$$

Пояснення до формули (4.14). Це реакційний баланс для двох вибраних стадій; він не враховує паливо, електроенергію, перевезення та інші складники викидів.

Усі частки ρ , η , α , β , w , d , ϕ , ℓ у розрахункових формулах виражені одиницями, якщо не вказано %. Перед підстановкою переведіть відсотки в частки: 5 % = 0,05. Нумерація формул діє лише в межах цієї роботи.

4. Організація обчислень та розв'язаний приклад

Повністю розібраний зразок

Показані всі основні підстановки за одним узгодженим навчальним набором. Під час виконання власного варіанта використовуйте той самий порядок, зокрема перевірки незалежним способом.

Вихідні дані прикладу: вапняк 500 кг; чистота 88 %; розклад 94 %; гашення 92 %; гіпсове в'язуче 120 кг; чистота 90 %; гідратація 85 %; карбонізація 60 %; друга партія $\times 1,25$.

1. $m(\text{CaCO}_3) = 500 \cdot 0,88 = 440,00$ кг; домішки = 60,00 кг.
2. $m(\text{CaCO}_3, \text{ розкл.}) = 440,00 \cdot 0,94 = 413,60$ кг; нерозкл. = 26,40 кг.
3. $m(\text{CaO}) = 413,60 \cdot 56,08 / 100,09 = 231,74$ кг.
4. $m(\text{CO}_2, \text{ випал.}) = 413,60 \cdot 44,01 / 100,09 = 181,86$ кг.
5. $m(\text{випаленого залишку}) = 500 - 181,86 = 318,14$ кг.
6. $m(\text{CaO, гаш.}) = 231,74 \cdot 0,92 = 213,20$ кг; негашене CaO = 18,54 кг.
7. $m(\text{H}_2\text{O, гаш.}) = 213,20 \cdot 18,015 / 56,08 = 68,49$ кг.
8. $m[\text{Ca}(\text{OH})_2] = 213,20 \cdot 74,09 / 56,08 = 281,67$ кг; перевірка: $213,20 + 68,49 \approx 281,67$ кг.
9. $m(\text{гіпсу, чист.}) = 120 \cdot 0,90 = 108,00$ кг.
10. $m(\text{H}_2\text{O, гіпс}) = 108,00 \cdot 0,85 \cdot 27,02 / 145,15 = 17,09$ кг; тверда фаза після твердіння $\approx 137,09$ кг.
11. $m(\text{CO}_2, \text{ зв'яз.}) = 281,67 \cdot 0,60 \cdot 44,01 / 74,09 = 100,39$ кг.
12. Умовна різниця двох реакцій = $181,86 - 100,39 = 81,47$ кг CO₂; для другої партії початкову масу й усі пов'язані матеріальні потоки множать на 1,25.

Перевірочний підсумок повного прикладу

Порівняйте розраховані вихідні й кінцеві маси, молярні співвідношення або геометричний об'єм. Числові розбіжності припустимі лише через зазначене округлення; різницю слід пояснити фізично.

5. СПІЛЬНІ ЗАВДАННЯ ДЛЯ ВСІХ 30 СТУДЕНТІВ

Обов'язково: блок А — повний наскрізний розрахунок за індивідуальними даними; блок Б — пов'язана зміна умов; блок В — незалежна перевірка та фаховий висновок.

А. Основний комплексний розрахунок (48 хв)

1. Знайти масу чистого CaCO_3 та інертних домішок у вихідному вапняку.
2. Визначити масу CaCO_3 , що розклалася, і масу нерозкладеного залишку.
3. Скласти рівняння термічного розкладу; визначити теоретичні маси CaO та CO_2 .
4. Визначити масу твердої фази після випалювання та перевірити закон збереження маси.
5. Знайти маси загашеного і негашеного CaO за заданого ступеня гашення.
6. Обчислити стехіометричну витрату води та масу утвореного Ca(OH)_2 .
7. Для заданого гіпсового в'язучого визначити чистий напівгідрат і масу домішок.
8. За ступенем гідратації гіпсу обчислити масу зв'язаної води та масу твердої фази після твердіння.
9. Оцінити масу зв'язаного CO_2 при частковій карбонізації одержаного гідроксиду кальцію.
10. Обчислити умовну різницю мас CO_2 для випалювання і карбонізації; назвати межі цієї оцінки.

Б. Перевірка альтернативної виробничої ситуації (27 хв)

1. Для другої партії, збільшеної на коефіцієнт k , перерахувати маси CaO та CO_2 за незмінних часток.
2. Для другої партії визначити витрату води на гашення й масу Ca(OH)_2 .
3. Якщо ступінь гашення зменшився на 5 процентних пунктів, визначити нову масу негашеного CaO .
4. Порівняти зв'язування CO_2 для β та $\beta/2$; пояснити, чому це не прогноз швидкості твердіння.

В. Обов'язкові перевірки та висновок (15 хв)

1. Перевірити $m(\text{вапняку}) = m(\text{твердого залишку}) + m(\text{CO}_2, \text{ випал.})$ з урахуванням округлення.
2. Перевірити $m(\text{CaO, гаш.}) + m(\text{H}_2\text{O, гаш.}) \approx m[\text{Ca(OH)}_2]$.
3. Обґрунтувати, чому хімічно необхідна вода не дорівнює технологічній витраті на приготування вапняного або гіпсового тіста.

30 індивідуальних варіантів вихідних даних

У кожній таблиці використовуйте той самий номер рядка. Відсотки перетворюйте на частки одиниці; маси та довжини переводьте до погоджених у формулах одиниць. Таблиці задають навчальні, а не виробничі параметри.

Вихідні дані — частина 1 із 2

№	вапняк, кг	CaCO_3 , %	розкл., %	гаш., %	гіпс, кг
1	415	83	92	91	95
2	430	86	94	94	100
3	445	89	96	97	105

№	вапняк, кг	СаСО ₃ , %	розкл., %	гаш., %	гіпс, кг
4	460	92	98	88	110
5	475	95	91	91	115
6	490	81	93	94	120
7	505	84	95	97	125
8	520	87	97	88	130
9	535	90	90	91	135
10	550	93	92	94	140
11	565	96	94	97	145
12	580	82	96	88	150
13	595	85	98	91	155
14	610	88	91	94	160
15	625	91	93	97	165
16	640	94	95	88	170
17	655	80	97	91	175
18	670	83	90	94	180
19	685	86	92	97	185
20	700	89	94	88	190
21	715	92	96	91	195
22	730	95	98	94	200
23	745	81	91	97	205
24	760	84	93	88	210
25	775	87	95	91	215
26	790	90	97	94	220
27	805	93	90	97	225
28	820	96	92	88	230
29	835	82	94	91	235
30	850	85	96	94	240

Вихідні дані — частина 2 із 2

№	гіпс, чист., %	гідр. гіпсу, %	карбоніз., %	к другої партії
1	89	82	43	1.15
2	92	84	46	1.20
3	95	86	49	1.25
4	98	88	52	1.30
5	88	90	55	1.35
6	91	92	58	1.40
7	94	94	61	1.45
8	97	96	64	1.50
9	87	81	67	1.10
10	90	83	70	1.15
11	93	85	73	1.20
12	96	87	40	1.25

№	гіпс, чист., %	гідр. гіпсу, %	карбоніз., %	к другої партії
13	86	89	43	1.30
14	89	91	46	1.35
15	92	93	49	1.40
16	95	95	52	1.45
17	98	80	55	1.50
18	88	82	58	1.10
19	91	84	61	1.15
20	94	86	64	1.20
21	97	88	67	1.25
22	87	90	70	1.30
23	90	92	73	1.35
24	93	94	40	1.40
25	96	96	43	1.45
26	86	81	46	1.50
27	89	83	49	1.10
28	92	85	52	1.15
29	95	87	55	1.20
30	98	89	58	1.25

6. Таблиця результатів для звіту

Заповніть за власним варіантом; укажіть одиниці, формулу і перевірку. Для зміненого сценарію Б запишіть окремий підсумок.

Контрольна величина	Мій результат	Одиниця / перевірка
CaCO ₃ у сировині, кг	_____	_____
CaO після випалювання, кг	_____	_____
CO ₂ випалювання, кг	_____	_____
випалений твердий залишок, кг	_____	_____
вода для гашення, кг	_____	_____
Ca(OH) ₂ , кг	_____	_____
вода гідратації гіпсу, кг	_____	_____
CO ₂ при карбонізації, кг	_____	_____

7. Типові помилки та правила перевірки

Не підставляти масу всього вапняку замість чистого CaCO_3 і не забувати про нерозкладений карбонат.

Не ототожнювати хімічну витрату води з водою, потрібною для реальної консистенції вапняного тіста.

Не віднімати масу CO_2 двічі: під час розкладу вона вже залишила твердий продукт.

Не називати реакційний CO_2 -баланс повним вуглецевим слідом технології.

8. Контрольні питання і висновок

- Чому маса CaO менша від маси карбонату, з якого воно утворилося?
- Чому за неповного гашення у вапняному матеріалі може залишитися реакційноздатне CaO ?
- Яку роль у формуванні структури гіпсового каменю відіграє кристалізація дигідрату?
- Чим відрізняються стехіометрія карбонізації та реальна швидкість твердіння вапняного розчину?

Шаблон висновку: «Для варіанта № ___ визначено ..., порівняно ..., перевірено У межах прийнятої моделі результат означає Для реального вибору матеріалу/рішення додатково потрібні ...».

Опорні джерела: [7, розд. 6, с. 98–107; 10, розд. про Кальцій і його сполуки; 2, розд. «Стехіометричні закони»]

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 5

Хімічний баланс портландцементу та бетонної суміші: гідратація, водоцементне відношення й добавки

Мета:

Розрахувати мінералогічні частки умовного клінкеру, часткову гідратацію C_3S і матеріальні потоки бетонної суміші з урахуванням вологості заповнювачів та водного розчину добавки.

Єдина виробнича/навчальна ситуація. НАВЧАЛЬНА МОДЕЛЬ. Готують навчальну партію бетону з визначеною масою цементу, піску, щебеню та цільовим В/Ц. В окремому хімічному балансі розглядають гідратацію лише аліту C_3S , не підміняючи нею складний реальний процес твердіння всього цементу. Вологість заповнювачів та вода розчину добавки враховуються у спільному водному балансі.

1. Теоретичні відомості

Портландцемент є гідравлічним в'язучим; його клінкер містить кілька мінеральних фаз, зокрема аліт C_3S , беліт C_2S , трикальцієвий алюмінат C_3A і алюмоферит C_4AF . Позначення цементної хімії є скороченнями: $C = CaO$, $S = SiO_2$, $A = Al_2O_3$, $F = Fe_2O_3$. Для прикладу приймаємо задані умовні масові частки, не трактуючи їх як паспортизований склад товарного цементу [7, с. 109–120].

Гідратація аліту у спрощеній схемі супроводжується утворенням кальцій-силікат-гідрату $C-S-H$ та $Ca(OH)_2$. Склад $C-S-H$ змінний, тому використана нижче формула є умовним стехіометричним представленням, придатним лише для навчального балансу чистого C_3S . Її не можна застосовувати для точного прогнозу портландиту реального цементу [7, с. 115–121].

Водоцементне відношення В/Ц — відношення загальної ефективно врахованої води в суміші до маси цементу. Пісок та щебінь уже можуть містити певну кількість води. Для цього розрахунку задана вологість означає масу води на одиницю сухої маси заповнювача; це важливе припущення, яке не можна непомітно замінити визначенням вологості від вологої маси [7, с. 125–137].

Добавка подається у вигляді водного розчину. Дозування за активною речовиною не збігається з масою товарного розчину; вода розчину входить до загальної води бетонної суміші. Якщо її не відняти від води замішування, фактичне В/Ц перевищить розрахункове [7, с. 164–168].

Абсолютний об'єм компонентів можна попередньо оцінити, ділячи їхні маси на задані густини. Цей підрахунок не містить повітряних пор, об'ємних змін і технологічної похибки, а тому не визначає реальний вихід або експлуатаційну міцність бетону.

Хімічно зв'язана вода в окремій реакції аліту є частиною води, але не тотожна повній потребі бетонної суміші у воді. Для висновків про міцність, довговічність і склад бетону необхідні випробування та застосовні стандарти.

2. Хімічні рівняння та припущення

$3CaO \cdot SiO_2$ (C_3S) — аліт; $2CaO \cdot SiO_2$ (C_2S) — беліт; $3CaO \cdot Al_2O_3$ (C_3A) — трикальцієвий алюмінат.

Умовна реакція: $2(3CaO \cdot SiO_2) + 6H_2O \rightarrow 3CaO \cdot 2SiO_2 \cdot 3H_2O + 3Ca(OH)_2$.

У формулах вологість w_p та $w_{щ}$ віднесена до сухої маси заповнювача; вода товарної добавки входить до В/Ц.

Маси — кг; об'єми — m^3 ; $M(C_3S)=228,32$; $M(H_2O)=18,015$; $M[Ca(OH)_2]=74,09$ кг/кмоль. Умовні густини: цемент — 3150; пісок і щебінь — 2650; вода — 1000; активна добавка — 1150 кг/ m^3 . Значення наведено лише для відпрацювання методу абсолютних об'ємів.

3. Формули для самостійного розрахунку

Як читати та застосовувати формули. Усі позначення використовують тільки для визначеної тут моделі. Спочатку розрахуйте масу чистих компонентів і стехіометрію; далі — реальні частки перетворення, втрати й об'ємні або поверхневі показники. Не додавайте різномірні величини та не використовуйте навчальний баланс як норму складу матеріалу.

$$m(C_3S) = m_{ц} \cdot x_1 \quad (5.1)$$

Пояснення до формули (5.1). x_1 — масова частка аліту в умовній масі цементу. Частки всіх мінеральних складових не повинні сумарно перевищувати 1.

$$m(C_2S) = m_{ц} \cdot x_2; m(C_3A) = m_{ц} \cdot x_3 \quad (5.2)$$

Пояснення до формули (5.2). Вміст беліту та алюмінату визначають із тієї самої загальної маси; у цій роботі їхню гідратацію кількісно не моделюють.

$$m(\text{інших фаз}) = m_{ц} \cdot (1 - x_1 - x_2 - x_3) \quad (5.3)$$

Пояснення до формули (5.3). Інші фази включають C_4AF та другорядні компоненти. Показник слугує для перевірки складу, а не для оцінки якості цементу.

$$m(C_3S, \text{гідр.}) = m(C_3S) \cdot \alpha \quad (5.4)$$

Пояснення до формули (5.4). α — ступінь гідратації тільки аліту. Відсоток гідратації всього цементу з нього без додаткових відомостей не визначити.

$$m[Ca(OH)_2] = m(C_3S, \text{гідр.}) \cdot 3 \cdot 74,09 / (2 \cdot 228,32) \quad (5.5)$$

Пояснення до формули (5.5). Рівняння умовної гідратації дає три молі $Ca(OH)_2$ із двох молів C_3S .

$$m(H_2O, \text{зв'яз. з } C_3S) = m(C_3S, \text{гідр.}) \cdot 6 \cdot 18,015 / (2 \cdot 228,32) \quad (5.6)$$

Пояснення до формули (5.6). Хімічно зв'язана вода — лише частина водного балансу; інші мінерали та фізично утримувана вода тут не враховані.

$$m(H_2O, \text{ціль}) = m_{ц} \cdot (В/Ц) \quad (5.7)$$

Пояснення до формули (5.7). Для цільового В/Ц множать його безрозмірне значення на масу цементу, а не на загальну масу бетонної суміші.

$$m(H_2O, \text{пісок}) = m_{п, \text{сух}} \cdot w_p; m(H_2O, \text{щебінь}) = m_{щ, \text{сух}} \cdot w_{щ} \quad (5.8)$$

Пояснення до формули (5.8). Вологість у цій задачі задана від сухої маси; у реальному проєктуванні складу додатково враховують поглинання води заповнювачами.

$$m(\text{добавки, актив.}) = m_{ц} \cdot d \quad (5.9)$$

Пояснення до формули (5.9). Дозування d віднесене до маси цементу за активною речовиною; його не можна підміняти масою товарного розчину.

$$m(\text{розчину добавки}) = m(\text{добавки, актив.}) / \phi \quad (5.10)$$

Пояснення до формули (5.10). ϕ — масова частка активної речовини у товарному розчині. Решта маси розчину в цьому прикладі — вода.

$$m(H_2O, \text{розчину добавки}) = m(\text{розчину добавки}) - m(\text{добавки, актив.}) \quad (5.11)$$

Пояснення до формули (5.11). Знайдена маса води належить до розрахункового В/Ц і зменшує кількість води, яку потрібно долити окремо.

$$m(\text{H}_2\text{O}, \text{ долив.}) = m(\text{H}_2\text{O}, \text{ ціль}) - m(\text{H}_2\text{O}, \text{ пісок}) - m(\text{H}_2\text{O}, \text{ щебінь}) - m(\text{H}_2\text{O}, \text{ розчину}) \quad (5.12)$$

Пояснення до формули (5.12). Отримана доливна вода має бути невід'ємною; якщо від'ємна, задані умови несумісні й вимагають перегляду суміші.

$$\text{В/Ц(факт.)} = [m(\text{H}_2\text{O}, \text{ долив.}) + m(\text{H}_2\text{O}, \text{ пісок}) + m(\text{H}_2\text{O}, \text{ щебінь}) + m(\text{H}_2\text{O}, \text{ розчину})] / m_{\text{ц}} \quad (5.13)$$

Пояснення до формули (5.13). Перевірка водного балансу — повторний незалежний підрахунок усієї внесеної води.

$$V(\text{абс., навч.}) = m_{\text{ц}}/3150 + m_{\text{п,сух}}/2650 + m_{\text{щ,сух}}/2650 + m(\text{H}_2\text{O}, \text{ ціль})/1000 + m(\text{добавки, актив.})/1150 \quad (5.14)$$

Пояснення до формули (5.14). Вода розчину добавки включена в загальну воду тільки один раз; об'ємне складання є спрощеною оцінкою без повітряних пор.

Усі частки ρ , η , α , β , w , d , ϕ , ℓ у розрахункових формулах виражені одиницями, якщо не вказано %. Перед підстановкою переведіть відсотки в частки: 5 % = 0,05. Нумерація формул діє лише в межах цієї роботи.

4. Організація обчислень та розв'язаний приклад

Повністю розібраний зразок

Показані всі основні підстановки за одним узгодженим навчальним набором. Під час виконання власного варіанта використовуйте той самий порядок, зокрема перевірки незалежним способом.

Вихідні дані прикладу: цемент 350 кг; C_3S 60 %, C_2S 18 %, C_3A 8 %, C_4AF 10 %; $\alpha(C_3S)=60$ %; В/Ц=0,48; сухий пісок 700 кг, вологість 3 %; сухий щебінь 1050 кг, вологість 0,5 %; дозування активної добавки 0,8 % цементу; у розчині 25 % активної речовини; зниження води в сценарії Б на 10 %.

1. $m(C_3S) = 350 \cdot 0,60 = 210,00$ кг; $C_2S = 63,00$ кг; $C_3A = 28,00$ кг; інші фази = 49,00 кг.
2. $m(C_3S, \text{ гідр.}) = 210,00 \cdot 0,60 = 126,00$ кг.
3. $m[Ca(OH)_2] = 126,00 \cdot (3 \cdot 74,09) / (2 \cdot 228,32) = 61,33$ кг.
4. $m(H_2O, \text{ зв'яз. } C_3S) = 126,00 \cdot (6 \cdot 18,015) / (2 \cdot 228,32) = 29,83$ кг.
5. $m(H_2O, \text{ ціль}) = 350 \cdot 0,48 = 168,00$ кг.
6. Вода в піску = $700 \cdot 0,03 = 21,00$ кг; у щебені = $1050 \cdot 0,005 = 5,25$ кг.
7. $m(\text{добавки, актив.}) = 350 \cdot 0,008 = 2,80$ кг; $m(\text{розчину}) = 2,80 / 0,25 = 11,20$ кг.
8. Вода розчину добавки = $11,20 - 2,80 = 8,40$ кг.
9. $m(H_2O, \text{ долив.}) = 168,00 - 21,00 - 5,25 - 8,40 = 133,35$ кг.
10. Перевірка: $(133,35 + 21,00 + 5,25 + 8,40) / 350 = 0,480$.
11. Навчальний абсолютний об'єм = $350 / 3150 + 700 / 2650 + 1050 / 2650 + 168 / 1000 + 2,80 / 1150 = 0,942$ м³ (без повітря).
12. Для умовного зниження води на 10 %: $m(H_2O, \text{ ціль Б}) = 151,20$ кг; В/Ц Б = 0,432; $m(\text{долив. Б}) = 116,55$ кг за тієї самої вологості.

Перевірочний підсумок повного прикладу

Порівняйте розраховані вихідні й кінцеві маси, молярні співвідношення або геометричний об'єм. Числові розбіжності припустимі лише через зазначене округлення; різницю слід пояснити фізично.

5. СПІЛЬНІ ЗАВДАННЯ ДЛЯ ВСІХ 30 СТУДЕНТІВ

Обов'язково: блок А — повний наскрізний розрахунок за індивідуальними даними; блок Б — пов'язана зміна умов; блок В — незалежна перевірка та фаховий висновок.

А. Основний комплексний розрахунок (48 хв)

1. Обчислити маси C_3S , C_2S , C_3A та решти мінеральних фаз.
2. Перевірити суму мінеральних часток і зазначити частку, що не описана трьома заданими мінералами.
3. За α знайти масу аліту, яка пройшла гідратацію.
4. За умовним рівнянням знайти маси портландиту та хімічно зв'язаної води для C_3S .
5. Знайти цільову загальну кількість води бетонної суміші за В/Ц.
6. За сухими масами й вологостями визначити воду, що надходить із піском і щебенем.
7. Обчислити масу активної добавки і загальну масу товарного розчину.
8. Визначити воду, внесену розчином добавки.
9. Розрахувати воду окремого доливання і перевірити невід'ємність.
10. Обчислити фактичне В/Ц та навчальний абсолютний об'єм компонентів.

Б. Перевірка альтернативної виробничої ситуації (27 хв)

1. Зменшити загальну воду на заданий відсоток g ; визначити нові В/Ц та воду окремого доливання.
2. За незмінного дозування активної речовини, але за зменшення частки ϕ на 5 процентних пунктів, перерахувати воду товарного розчину і доливну воду.
3. Порівняти цільове й змінене В/Ц, не роблячи висновку про міцність бетону без випробувань.
4. Описати, які додаткові дані потрібні для переходу від навчального абсолютного об'єму до складу 1 м^3 реальної бетонної суміші.

В. Обов'язкові перевірки та висновок (15 хв)

1. Виконати перевірку сумарної маси мінеральних фаз.
2. Незалежно перевірити баланс загальної води та фактичне В/Ц.
3. Пояснити, чому маса води гідратації лише C_3S не є повною витратою води у бетоні.

30 індивідуальних варіантів вихідних даних

У кожній таблиці використовуйте той самий номер рядка. Відсотки перетворюйте на частки одиниці; маси та довжини переводьте до погоджених у формулах одиниць. Таблиці задають навчальні, а не виробничі параметри.

Вихідні дані — частина 1 із 3

№	цемент, кг	C ₃ S, %	C ₂ S, %	C ₃ A, %	α(C ₃ S), %
1	290	53	17	6	45
2	295	56	19	7	50
3	300	59	21	8	55
4	305	62	23	9	60
5	310	65	15	10	65
6	315	50	17	5	70
7	320	53	19	6	75
8	325	56	21	7	80
9	330	59	23	8	40
10	335	62	15	9	45
11	340	65	17	10	50
12	345	50	19	5	55
13	350	53	21	6	60
14	355	56	23	7	65
15	360	59	15	8	70
16	365	62	17	9	75
17	370	65	19	10	80
18	375	50	21	5	40
19	380	53	23	6	45
20	385	56	15	7	50
21	390	59	17	8	55
22	395	62	19	9	60
23	400	65	21	10	65
24	405	50	23	5	70
25	410	53	15	6	75
26	415	56	17	7	80
27	420	59	19	8	40
28	425	62	21	9	45
29	430	65	23	10	50
30	435	50	15	5	55

Вихідні дані — частина 2 із 3

№	В/Ц	пісок сух., кг	волога п., %	щебінь сух., кг	волога щ., %
1	0.44	632	1.5	959	0.4
2	0.46	644	2.0	968	0.6
3	0.48	656	2.5	977	0.8
4	0.50	668	3.0	986	1.0
5	0.52	680	3.5	995	0.2
6	0.54	692	4.0	1004	0.4
7	0.56	704	4.5	1013	0.6

№	В/Ц	пісок сух., кг	волога п., %	щебінь сух., кг	волога щ., %
8	0.42	716	1.0	1022	0.8
9	0.44	728	1.5	1031	1.0
10	0.46	740	2.0	1040	0.2
11	0.48	752	2.5	1049	0.4
12	0.50	764	3.0	1058	0.6
13	0.52	776	3.5	1067	0.8
14	0.54	788	4.0	1076	1.0
15	0.56	800	4.5	1085	0.2
16	0.42	812	1.0	1094	0.4
17	0.44	824	1.5	1103	0.6
18	0.46	836	2.0	1112	0.8
19	0.48	848	2.5	1121	1.0
20	0.50	860	3.0	1130	0.2
21	0.52	872	3.5	1139	0.4
22	0.54	884	4.0	1148	0.6
23	0.56	896	4.5	1157	0.8
24	0.42	908	1.0	1166	1.0
25	0.44	920	1.5	1175	0.2
26	0.46	932	2.0	1184	0.4
27	0.48	944	2.5	1193	0.6
28	0.50	956	3.0	1202	0.8
29	0.52	968	3.5	1211	1.0
30	0.54	980	4.0	1220	0.2

Вихідні дані — частина 3 із 3

№	добавка, %	ф розчину, %	г води, %
1	0.5	23	9
2	0.6	26	11
3	0.7	29	13
4	0.8	32	15
5	0.4	20	17
6	0.5	23	7
7	0.6	26	9
8	0.7	29	11
9	0.8	32	13
10	0.4	20	15
11	0.5	23	17
12	0.6	26	7
13	0.7	29	9
14	0.8	32	11
15	0.4	20	13

№	добавка, %	ф розчину, %	г води, %
16	0.5	23	15
17	0.6	26	17
18	0.7	29	7
19	0.8	32	9
20	0.4	20	11
21	0.5	23	13
22	0.6	26	15
23	0.7	29	17
24	0.8	32	7
25	0.4	20	9
26	0.5	23	11
27	0.6	26	13
28	0.7	29	15
29	0.8	32	17
30	0.4	20	7

6. Таблиця результатів для звіту

Заповніть за власним варіантом; укажіть одиниці, формулу і перевірку. Для зміненого сценарію Б запишіть окремий підсумок.

Контрольна величина	Мій результат	Одиниця / перевірка
СзС у цементі, кг	_____	_____
портландит (модель), кг	_____	_____
вода гідратації СзС, кг	_____	_____
цільова вода, кг	_____	_____
вода з піску, кг	_____	_____
вода зі щебеню, кг	_____	_____
товарний розчин добавки, кг	_____	_____
доливна вода, кг	_____	_____
В/Ц факт.	_____	_____
абсолютний об'єм, м³	_____	_____

7. Типові помилки та правила перевірки

Не змішувати різні бази вологості заповнювачів і не застосовувати відсотки до вологої маси без відповідного перерахунку.

Не вважати 25%-й розчин добавки 100%-ю активною речовиною; врахувати внесену ним воду.

Не перетворювати ідеалізовану реакцію аліту на реальну модель складу всього цементного каменю.

Не трактувати навчальний абсолютний об'єм як гарантований вихід бетону чи його міцність.

8. Контрольні питання і висновок

- Що позначають C, S, A, F у цементній хімії?
- Чому під час гідратації аліту одночасно утворюються C–S–H та Ca(OH)_2 ?
- Чому воду із заповнювачів і розчину добавки потрібно враховувати у В/Ц?
- Чому два бетони з однаковим розрахунковим В/Ц можуть мати різні властивості?

Шаблон висновку: «Для варіанта № __ визначено ..., порівняно ..., перевірено У межах прийнятої моделі результат означає Для реального вибору матеріалу/рішення додатково потрібні ...».

Опорні джерела: [7, розд. 7–8, с. 109–137, 164–168; 2, розд. «Кінетика і рівновага»]

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 6

Сировинний та тепловий баланс керамічних і скляних матеріалів: дегідроксилювання та газовиділення

Мета:

Застосувати хімічну стехіометрію до двох незалежних моделей: дегідроксилювання глинистої сировини під час випалювання та втрат CO_2 під час скловаріння; обчислити мінімальну енергію видалення води.

Єдина виробнича/навчальна ситуація. НАВЧАЛЬНА МОДЕЛЬ. Для керамічного виробу використовують зволожену глину з певною часткою каолініту й карбонатною домішкою. Окремий варіант виробництва скла використовує кварцовий пісок, соду і вапняк. Розрахуйте залишок після обраних реакцій дегідроксилювання й декарбонізації. Суміші та технологічні процеси є незалежними навчальними моделями; не складайте їхні залишки між собою.

1. Теоретичні відомості

Кераміка — матеріал, властивості якого формуються при обробці мінеральної сировини, сушінні та випалюванні. Глинисті мінерали містять хімічно зв'язані гідроксильні групи; при нагріванні можливе дегідроксилювання, відмінне від видалення вільної вологи. Для модельного розрахунку беремо ідеалізований каолініт $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$. Реальна глина має складніший мінералогічний склад [7, с. 62–89].

Вологість за умовою задана як масова частка води у вологій глині. Маса сухої сировини дорівнює різниці маси вологої глини та вологи; частку каолініту задано саме у сухій частині. Ці дві бази важливо не плутати [7, с. 62–69].

За обраним рівнянням дегідроксилювання один моль каолініту втрачає два моля води. Частка перетворення визначає, скільки чистого каолініту пройшло цю стадію; у моделі решта залишається незмінною. Додаткові високотемпературні фазові перетворення та масові втрати окремо не обчислюють.

При декарбонізації вапняку CaCO_3 виділяється CO_2 . У скляній шихті джерелом лужних оксидів часто є карбонати натрію. Взаємодія карбонатів із компонентами силікатного розплаву супроводжується газовиділенням. Наведений баланс газу є умовним стехіометричним наближенням і не встановлює реального температурного режиму скловаріння [7, с. 90–96].

Маса скломаси після газовиділення в цій задачі — початкова маса сухої шихти мінус маса CO_2 із двох карбонатів. Чистий кварц приймають як джерело SiO_2 , а всі інертні домішки залишаються у матеріалі. Цей результат не є прогнозом хімічного складу або оптичних властивостей готового скла.

Для сушіння глини розраховують лише теоретичну нижню межу підведення теплоти: підігрів вихідної води від 20 до 100 °C і її пароутворення за заданою питомою теплотою. Цей спрощений баланс не враховує нагрівання керамічного черепка, нагрівання пічної кладки, втрати, теплоту реакцій і неповне використання енергії.

2. Хімічні рівняння та припущення

Ідеалізоване дегідроксилювання: $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \uparrow$.

Карбонат: $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2 \uparrow$.

Навчальна схема газовиділення у силікатній шихті: $\text{Na}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{Na}_2\text{O}$ (у складі силікатів) + $\text{CO}_2\uparrow$; вільний Na_2O як окремий стабільний продукт не припускається.

Маси — кг; $M(\text{каолініту})=258,16$; $M(\text{H}_2\text{O})=18,015$; $M(\text{CaCO}_3)=100,09$; $M(\text{CO}_2)=44,01$; $M(\text{Na}_2\text{CO}_3)=105,99$ кг/кмоль. Для теоретичного сушіння с води = 4,18 кДж/(кг·К), питома теплота пароутворення $L = 2257$ кДж/кг за 100 °С; вихідна температура води 20 °С.

3. Формули для самостійного розрахунку

Як читати та застосовувати формули. Усі позначення використовують тільки для визначеної тут моделі. Спочатку розрахуйте масу чистих компонентів і стехіометрію; далі — реальні частки перетворення, втрати й об'ємні або поверхневі показники. Не додавайте різномірні величини та не використовуйте навчальний баланс як норму складу матеріалу.

$$m(\text{суха глина}) = m(\text{волога глина}) \cdot (1 - w) \quad (6.1)$$

Пояснення до формули (6.1). w — частка фізично присутньої води у всій вологій масі; не плутати з часткою від сухої маси.

$$m(\text{H}_2\text{O, вільна}) = m(\text{волога глина}) \cdot w \quad (6.2)$$

Пояснення до формули (6.2). Цю воду видаляють під час сушіння; вона не є водою кристалічної будови каолініту.

$$m(\text{каолініту}) = m(\text{суха глина}) \cdot r_k \quad (6.3)$$

Пояснення до формули (6.3). Чистий каолін визначають з маси сухої частини глини. Решта сухої маси в розрахунку інертна.

$$m(\text{H}_2\text{O, дегідр.}) = m(\text{каолініту}) \cdot a_k \cdot (2 \cdot 18,015 / 258,16) \quad (6.4)$$

Пояснення до формули (6.4). Для двох молів води на моль каолініту множимо лише масу мінералу, що пройшла реакцію.

$$m(\text{CO}_2, \text{кераміка}) = m(\text{вапняку}) \cdot r_v \cdot \eta_v \cdot (44,01 / 100,09) \quad (6.5)$$

Пояснення до формули (6.5). r_v — чистота карбонатної добавки, η_v — частка розкладу її CaCO_3 ; решта залишається твердою.

$$m(\text{керамічного залишку}) = m(\text{суха глина}) + m(\text{вапняку}) - m(\text{H}_2\text{O, дегідр.}) - m(\text{CO}_2, \text{кераміка}) \quad (6.6)$$

Пояснення до формули (6.6). Баланс сухої шихти без урахування пізніших втрат; вільну воду вже вилучено на першій стадії.

$$Q(\text{води, мін.}) = m(\text{H}_2\text{O, вільна}) \cdot [4,18 \cdot (100 - 20) + 2257] \quad (6.7)$$

Пояснення до формули (6.7). Це мінімальна навчальна теплота води за даних початкових і кінцевих умов; реальна сушарка витратить більше енергії.

$$m(\text{SiO}_2, \text{кварц}) = m(\text{кварцу}) \cdot r_{kv} \quad (6.8)$$

Пояснення до формули (6.8). За даними шихти r_{kv} є часткою чистого кварцу; формула не враховує можливу кремнеземисту складову інших матеріалів.

$$m(\text{CO}_2, \text{сода}) = m(\text{соди}) \cdot r_{sc} \cdot \eta_{sc} \cdot (44,01 / 105,99) \quad (6.9)$$

Пояснення до формули (6.9). Кількість газу визначають із чистого Na_2CO_3 , що взяв участь у силікатному перетворенні.

$$m(\text{CO}_2, \text{вапняк у склі}) = m(\text{вапняку скляного}) \cdot r_{vsc} \cdot \eta_{vsc} \cdot (44,01 / 100,09) \quad (6.10)$$

Пояснення до формули (6.10). Це незалежна порція карбонату для скляної шихти, не та сама добавка, що у кераміці.

$$m(\text{сухої скляної шихти}) = m(\text{кварцу}) + m(\text{соди}) + m(\text{вапняку скляного}) \quad (6.11)$$

Пояснення до формули (6.11). Маса кожної вихідної технічної сировини включає її інертні домішки.

$$m(\text{умовної скломаси}) = m(\text{сухої скляної шихти}) - m(\text{CO}_2, \text{ сода}) - m(\text{CO}_2, \text{ вапняк у склі}) \quad (6.12)$$

Пояснення до формули (6.12). За припущенням усі інші компоненти залишаються в розплаві, а єдині газові втрати — зазначений CO_2 .

$$w(\text{SiO}_2, \text{ скломаса}) = m(\text{SiO}_2, \text{ кварц}) / m(\text{умовної скломаси}) \quad (6.13)$$

Пояснення до формули (6.13). Обчислена частка стосується лише SiO_2 із кварцової сировини в умовному продукті; реальний склад скла уточнюють аналізом.

Усі частки p , η , α , β , w , d , ϕ , ℓ у розрахункових формулах виражені одиницями, якщо не вказано %. Перед підстановкою переведіть відсотки в частки: $5\% = 0,05$. Нумерація формул діє лише в межах цієї роботи.

4. Організація обчислень та розв'язаний приклад

Повністю розібраний зразок

Показані всі основні підстановки за одним узгодженим навчальним набором. Під час виконання власного варіанта використовуйте той самий порядок, зокрема перевірки незалежним способом.

Вихідні дані прикладу: волога глина 1200 кг, вода 12 %, каолінит у сухій частині 65 %, його дегідроксилювання 80 %; керамічна карбонатна добавка 40 кг, чистота 90 %, розклад 95 %; окрема скляна шихта: кварц 800 кг, чистота 95 %, сода 200 кг, чистота 95 %, реакція 96 %, вапняк 150 кг, чистота 90 %, розклад 98 %.

1. Суха глина = $1200 \cdot (1 - 0,12) = 1056,00$ кг; вільна вода = 144,00 кг.
2. Каолінит = $1056,00 \cdot 0,65 = 686,40$ кг.
3. Вода дегідроксилювання = $686,40 \cdot 0,80 \cdot (2 \cdot 18,015 / 258,16) = 76,64$ кг.
4. CO_2 керамічної карбонатної добавки = $40 \cdot 0,90 \cdot 0,95 \cdot 44,01 / 100,09 = 15,04$ кг.
5. Керамічний твердий залишок = $1056,00 + 40 - 76,64 - 15,04 = 1004,32$ кг.
6. Мінімум теплоти для видалення вільної води = $144 \cdot [4,18 \cdot 80 + 2257] = 373,162$ кДж (без теплових втрат).
7. Чистий кварц = $800 \cdot 0,95 = 760,00$ кг SiO_2 .
8. CO_2 скляної соди = $200 \cdot 0,95 \cdot 0,96 \cdot 44,01 / 105,99 = 75,74$ кг.
9. CO_2 скляного вапняку = $150 \cdot 0,90 \cdot 0,98 \cdot 44,01 / 100,09 = 58,17$ кг.
10. Маса сухої скляної шихти = $800 + 200 + 150 = 1150,00$ кг.
11. Маса умовної скломаси = $1150 - 75,74 - 58,17 = 1016,09$ кг.
12. Частка SiO_2 з кварцу = $760 / 1016,09 \cdot 100\% = 74,80\%$; у керамічному та скляному балансах немає спільної маси продукту.

Перевірочний підсумок повного прикладу

Порівняйте розраховані вихідні й кінцеві маси, молярні співвідношення або геометричний об'єм. Числові розбіжності припустимі лише через зазначене округлення; різницю слід пояснити фізично.

5. СПІЛЬНІ ЗАВДАННЯ ДЛЯ ВСІХ 30 СТУДЕНТІВ

Обов'язково: блок А — повний наскрізний розрахунок за індивідуальними даними; блок Б — пов'язана зміна умов; блок В — незалежна перевірка та фаховий висновок

А. Основний комплексний розрахунок (48 хв)

1. За вологою масою та вмістом води визначити суху масу глини і масу вільної води.
2. Знайти масу чистого каолініту та сухих інертних компонентів.
3. Розрахувати стехіометричну втрату води під час заданого дегідроксилювання.
4. Обчислити CO_2 із карбонатної добавки керамічної суміші.
5. Знайти масу умовного керамічного залишку після сушіння і випалювання.
6. Обчислити нижню межу теплоти для нагрівання та випаровування вільної води.
7. Для окремої скляної шихти визначити масу чистого кварцу та маси домішок.
8. Знайти CO_2 , що виходить із чистого Na_2CO_3 за заданого ступеня реакції.
9. Розрахувати CO_2 із вапняку скляної шихти.
10. Знайти умовну масу скломаси та частку SiO_2 , внесеного кварцом.

Б. Перевірка альтернативної виробничої ситуації (27 хв)

1. За збільшення вологості глини на 3 процентні пункти за незмінної загальної вологої маси перерахувати суху частину і енергетичний мінімум.
2. Порівняти керамічний залишок за початкового α к та після зменшення α к на 10 процентних пунктів.
3. Для скляної шихти збільшити масу соди на 10 % і знову знайти її частку у вихідній сухій шихті та CO_2 .
4. Пояснити, чому наведена енергія сушіння не є потребою в енергії всієї печі для випалювання.

В. Обов'язкові перевірки та висновок (15 хв)

1. Перевірити баланс вологої глини: суха глина + вільна вода.
2. Перевірити баланс сухої керамічної шихти та окремо скляної шихти після віднімання газів.
3. Пояснити різницю між фізичним видаленням води та дегідроксилюванням мінералу.

30 індивідуальних варіантів вихідних даних

У кожній таблиці використовуйте той самий номер рядка. Відсотки перетворюйте на частки одиниці; маси та довжини переводьте до погоджених у формулах одиниць. Таблиці задають навчальні, а не виробничі параметри.

Вихідні дані — частина 1 із 3

№	глина волог., кг	вода, %	каолінит, %	дегідр., %	вапняк кер., кг
1	874	9	59	70	34
2	898	10	63	75	38
3	922	11	67	80	42

№	глина волог., кг	вода, %	каолінит, %	дегідр., %	вапняк кер., кг
4	946	12	71	85	46
5	970	13	75	90	50
6	994	14	79	95	54
7	1018	8	83	65	58
8	1042	9	55	70	30
9	1066	10	59	75	34
10	1090	11	63	80	38
11	1114	12	67	85	42
12	1138	13	71	90	46
13	1162	14	75	95	50
14	1186	8	79	65	54
15	1210	9	83	70	58
16	1234	10	55	75	30
17	1258	11	59	80	34
18	1282	12	63	85	38
19	1306	13	67	90	42
20	1330	14	71	95	46
21	1354	8	75	65	50
22	1378	9	79	70	54
23	1402	10	83	75	58
24	1426	11	55	80	30
25	1450	12	59	85	34
26	1474	13	63	90	38
27	1498	14	67	95	42
28	1522	8	71	65	46
29	1546	9	75	70	50
30	1570	10	79	75	54

Вихідні дані — частина 2 із 3

№	чистота в., %	розклад в., %	кварц, кг	SiO ₂ , %	сода, кг
1	88	91	615	92	135
2	89	92	630	93	140
3	90	93	645	94	145
4	91	94	660	95	150
5	92	95	675	96	155
6	93	96	690	97	160
7	94	97	705	98	165
8	87	98	720	91	170
9	88	90	735	92	175
10	89	91	750	93	180

№	чистота в., %	розклад в., %	кварц, кг	SiO ₂ , %	сода, кг
11	90	92	765	94	185
12	91	93	780	95	190
13	92	94	795	96	195
14	93	95	810	97	200
15	94	96	825	98	205
16	87	97	840	91	210
17	88	98	855	92	215
18	89	90	870	93	220
19	90	91	885	94	225
20	91	92	900	95	230
21	92	93	915	96	235
22	93	94	930	97	240
23	94	95	945	98	245
24	87	96	960	91	250
25	88	97	975	92	255
26	89	98	990	93	260
27	90	90	1005	94	265
28	91	91	1020	95	270
29	92	92	1035	96	275
30	93	93	1050	97	280

Вихідні дані — частина 3 із 3

№	чистота с., %	реакція с., %	вапняк скл., кг	чист. скл. в., %	розкл. скл. в., %
1	94	89	114	89	91
2	95	90	118	90	92
3	96	91	122	91	93
4	97	92	126	92	94
5	98	93	130	93	95
6	93	94	134	94	96
7	94	95	138	95	97
8	95	96	142	88	98
9	96	97	146	89	90
10	97	88	150	90	91
11	98	89	154	91	92
12	93	90	158	92	93
13	94	91	162	93	94
14	95	92	166	94	95
15	96	93	170	95	96
16	97	94	174	88	97
17	98	95	178	89	98

№	чистота с., %	реакція с., %	вапняк скл., кг	чист. скл. в., %	розкл. скл. в., %
18	93	96	182	90	90
19	94	97	186	91	91
20	95	88	190	92	92
21	96	89	194	93	93
22	97	90	198	94	94
23	98	91	202	95	95
24	93	92	206	88	96
25	94	93	210	89	97
26	95	94	214	90	98
27	96	95	218	91	90
28	97	96	222	92	91
29	98	97	226	93	92
30	93	88	230	94	93

6. Таблиця результатів для звіту

Заповніть за власним варіантом; укажіть одиниці, формулу і перевірку. Для зміненого сценарію Б запишіть окремий підсумок.

Контрольна величина	Мій результат	Одиниця / перевірка
суха глина, кг	_____	_____
каолініт, кг	_____	_____
вода дегідр., кг	_____	_____
CO ₂ кераміки, кг	_____	_____
твердий залишок, кг	_____	_____
мін. теплота сушіння, кДж	_____	_____
CO ₂ соди, кг	_____	_____
CO ₂ вапняку скляного, кг	_____	_____
умовна скломаса, кг	_____	_____
SiO ₂ із кварцу, %	_____	_____

7. Типові помилки та правила перевірки

Не обчислювати вміст каолініту від вологої маси, якщо його частка задана в сухій глині.

Не вважати вільну воду і структурну воду каолініту одним процесом видалення.

Не підміняти декарбонізацію в силікатному розплаві простим фактичним виділенням стійкого чистого Na_2O .

Не включати до мінімуму енергії сушіння ненаведені втрати печі та нагрів сухих матеріалів.

8. Контрольні питання і висновок

- Чим відрізняються сушіння глини та дегідроксилювання каолініту?
- Які газові продукти дають карбонатні складові скляної шихти?
- Чому після випалювання маса керамічного виробу менша від маси сухої шихти?
- Чому умовну оцінку кількості CO_2 не можна безпосередньо використати як промислові дані печі?

Шаблон висновку: «Для варіанта № ___ визначено ..., порівняно ..., перевірено У межах прийнятої моделі результат означає Для реального вибору матеріалу/рішення додатково потрібні ...».

Опорні джерела: [7, розд. 4–5, с. 62–96; 10, розд. про Силіцій і силікати; 2, розд. «Енергетика процесів»]

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 7

Аналіз будівельної води: жорсткість, солевміст, агресивність і можливе висолоутворення

Мета:

Перерахувати вміст йонів будівельної води в масові показники та жорсткість, оцінити окремі стехіометричні сценарії осадоутворення і нейтралізації; навчитися відокремлювати розрахунок від нормативної оцінки агресивності.

Єдина виробнича/навчальна ситуація. НАВЧАЛЬНА МОДЕЛЬ. Для проби води задано концентрації Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Cl^- та HCO_3^- . Визначають кальцієву, магнієву й загальну жорсткість, маси вимірюваних йонів у заданому об'ємі, умовний можливий осад CaCO_3 і окремий верхній стехіометричний баланс гіпсу. Для незалежної партії умовно підкисленої води задано кислотність у ммоль $\text{H}^+/\text{л}$ і розраховують нейтралізацію вапном; параметри двох сценаріїв не змішують.

1. Теоретичні відомості

Вода в будівництві бере участь у твердінні в'язучих, приготуванні сумішей і контакті споруд із середовищем. Хімічні характеристики води відбивають її йонний склад, лужність, кислотність та потенційну здатність переносити речовини. Вплив на бетон залежить також від проникності матеріалу, часу контакту, температури, руху розчину та інших умов [7, с. 120, 146–151; 9, гл. 2].

Жорсткість води пов'язують насамперед з концентраціями Ca^{2+} і Mg^{2+} . У цій методиці вона обчислюється в ммоль/л двовалентних катіонів і окремо в ммоль еквівалентів на літр; в останньому випадку внесок кожного двозарядного йона множать на 2. Змішування одиниць створює систематичну похибку вдвічі.

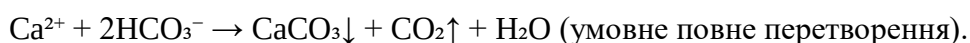
Карбонат кальцію може утворюватися при перетворенні розчинених гідрогенкарбонатів за відповідних умов. Для обмежувального реагенту порівнюють молі Ca^{2+} та половину молів HCO_3^- . Отриманий результат є верхньою стехіометричною оцінкою за повного відповідного перетворення; реальне утворення висолів чи накипу залежить від рівноваги, перенесення води та кристалізації.

Сульфатні йони можуть бути причетні до взаємодії з цементним каменем, а хлориди — до порушення пасивного стану арматури. Однак сама лише концентрація SO_4^{2-} або Cl^- ще не встановлює клас агресивності води, достатність захисного шару чи можливість застосування конкретної води в бетоні. Для таких висновків потрібні відповідні стандарти, повний аналіз і умови експлуатації [9, гл. 2; 8, розд. 5–6].

Оцінки максимальних мас CaCO_3 та $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ обчислюють як два окремі гіпотетичні сценарії, кожен із яких може використати частину тих самих йонів кальцію. Вони не утворюють двох гарантованих одночасних осадів і їхні маси додавати некоректно.

Нейтралізація в умовному кислому стоку — окремий розрахунок за заданою кислотністю в ммоль $\text{H}^+/\text{л}$. Стехіометрична маса $\text{Ca}(\text{OH})_2$ не включає буферність реальної води, кінетику розчинення, домішки реагенту чи осадоутворення; це завдання не є інструкцією з очищення стоків.

2. Хімічні рівняння та припущення



$\text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \downarrow$ (стехіометричний верхній сценарій, не прогноз осадження).

$\text{Ca}(\text{OH})_2 + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{Ca}^{2+} + 2\text{H}_2\text{O}$ (нейтралізація окремої умовно підкисленої води).

Концентрації — мг/л; V — м³; Н — ммоль/л або ммоль-екв/л; M(Ca)=40,08, M(Mg)=24,305, M(SO₄)=96,06, M(HCO₃)=61,016, M(CaCO₃)=100,09, M(CaSO₄·2H₂O)=172,17, M[Ca(OH)₂]=74,09 г/моль; 1 м³ = 1000 л.

3. Формули для самостійного розрахунку

Як читати та застосовувати формули. Усі позначення використовують тільки для визначеної тут моделі. Спочатку розрахуйте масу чистих компонентів і стехіометрію; далі — реальні частки перетворення, втрати й об'ємні або поверхневі показники. Не додавайте різні величини та не використовуйте навчальний баланс як норму складу матеріалу.

$$V(\text{л}) = 1000 \cdot V(\text{м}^3) \quad (7.1)$$

Пояснення до формули (7.1). Об'єм у літрах потрібний для переходу від мг/л до загальної маси розчиненого йона.

$$H(\text{Ca}^{2+}) = C(\text{Ca, мг/л}) / 40,08 \quad (7.2)$$

Пояснення до формули (7.2). При діленні масової концентрації на молярну масу числовий результат у ммоль Ca²⁺ на літр.

$$H(\text{Mg}^{2+}) = C(\text{Mg, мг/л}) / 24,305 \quad (7.3)$$

Пояснення до формули (7.3). Аналогічно визначають ммоль/л Mg²⁺; значення жорсткості стосується лише цих двох катіонів.

$$H(\text{заг., ммоль/л}) = H(\text{Ca}^{2+}) + H(\text{Mg}^{2+}) \quad (7.4)$$

Пояснення до формули (7.4). Сума означає кількість молів двовалентних катіонів на літр.

$$H(\text{заг., ммоль-екв/л}) = 2 \cdot H(\text{заг., ммоль/л}) \quad (7.5)$$

Пояснення до формули (7.5). Еквівалентна концентрація враховує заряди +2 обох йонів.

$$m(i, \text{кг}) = C(i, \text{мг/л}) \cdot V(\text{л}) / 10^6 \quad (7.6)$$

Пояснення до формули (7.6). Знаходимо загальну масу кожного вимірюваного йона (Ca²⁺, Mg²⁺, SO₄²⁻, Cl⁻ і HCO₃⁻) в заданому об'ємі води.

$$n(\text{SO}_4^{2-}, \text{ммоль/л}) = C(\text{SO}_4^{2-}, \text{мг/л}) / 96,06 \quad (7.7)$$

Пояснення до формули (7.7). Цей показник порівнюють з кальцієвим для окремої гіпотетичної сульфатної реакції.

$$m(\text{гіпсу, кг}) \leq \min[H(\text{Ca}^{2+}), n(\text{SO}_4^{2-})] \cdot 172,17 \cdot V(\text{л}) / 10^6 \quad (7.8)$$

Пояснення до формули (7.8). Мінімум концентрацій визначає обмежувальний йон для верхньої стехіометричної межі; реальне утворення гіпсу не гарантовано.

$$n(\text{HCO}_3^-, \text{ммоль/л}) = C(\text{HCO}_3^-, \text{мг/л}) / 61,016 \quad (7.9)$$

Пояснення до формули (7.9). У карбонатній моделі два йони HCO₃⁻ потрібні на один йон Ca²⁺.

$$m(\text{CaCO}_3, \text{кг}) \leq \min[H(\text{Ca}^{2+}), n(\text{HCO}_3^-)/2] \cdot 100,09 \cdot V(\text{л}) / 10^6 \quad (7.10)$$

Пояснення до формули (7.10). Це окремий гіпотетичний верхній сценарій, не складник одночасного сумарного осаду з формули (7.8).

$$m[\text{Ca}(\text{OH})_2, \text{кг}] = a(\text{ммоль H}^+/\text{л}) \cdot V(\text{л}) \cdot 74,09 / (2 \cdot 10^6) \quad (7.11)$$

Пояснення до формули (7.11). Для нейтралізації двох молів H^+ потрібен один моль $Ca(OH)_2$. Розрахунок належить до іншої умовної проби кислого стоку.

$$m(SO_4^{2-} + Cl^-, \text{ кг}) = [C(SO_4^{2-}) + C(Cl^-)] \cdot V(\text{л}) / 10^6 \quad (7.12)$$

Пояснення до формули (7.12). Сума визначає масу лише двох аналітично вимірюваних аніонів; вона не дорівнює масі кристалічних солей або повному сухому залишку.

Усі частки p , η , α , β , w , d , φ , ℓ у розрахункових формулах виражені одиницями, якщо не вказано %. Перед підстановкою переведіть відсотки в частки: $5\% = 0,05$. Нумерація формул діє лише в межах цієї роботи.

4. Організація обчислень та розв'язаний приклад

Повністю розібраний зразок

Показані всі основні підстановки за одним узгодженим навчальним набором. Під час виконання власного варіанта використовуйте той самий порядок, зокрема перевірки незалежним способом.

Вихідні дані прикладу: вода $2,5 \text{ м}^3$; Ca^{2+} 80 мг/л ; Mg^{2+} 24 мг/л ; SO_4^{2-} 140 мг/л ; Cl^- 75 мг/л ; HCO_3^- 160 мг/л ; кислотність окремої умовної проби $a = 0,8 \text{ ммоль } H^+/\text{л}$.

1. $Об'єм = 2,5 \cdot 1000 = 2500 \text{ л}$.
2. $N(Ca^{2+}) = 80/40,08 = 1.996 \text{ ммоль/л}$; $N(Mg^{2+}) = 24/24,305 = 0.987 \text{ ммоль/л}$.
3. $N(\text{заг., двовал. катіони}) = 2.983 \text{ ммоль/л}$.
4. $N(\text{заг., екв.}) = 2 \cdot 2.983 = 5.967 \text{ ммоль-екв/л}$.
5. $m(Ca^{2+}) = 80 \cdot 2500/10^6 = 0,200 \text{ кг}$; $m(Mg^{2+}) = 0,060 \text{ кг}$.
6. $m(SO_4^{2-}) = 140 \cdot 2500/10^6 = 0,350 \text{ кг}$; $m(Cl^-) = 0,188 \text{ кг}$; $m(HCO_3^-) = 0,400 \text{ кг}$.
7. $n(SO_4^{2-}) = 140/96,06 = 1.457 \text{ ммоль/л}$; $N(Ca^{2+}) = 1.996 \text{ ммоль/л}$.
8. Окремий стехіометричний максимум гіпсу $= \min(1.996; 1.457) \cdot 172,17 \cdot 2500/10^6 = 0.627 \text{ кг}$.
9. $n(HCO_3^-) = 160/61,016 = 2.622 \text{ ммоль/л}$; верхня маса $CaCO_3 = 0.328 \text{ кг}$ (інший незалежний сценарій).
10. У незалежній умовно підкисленій пробі: $m[Ca(OH)_2] = 0,8 \cdot 2500 \cdot 74,09/(2 \cdot 10^6) = 0.0741 \text{ кг}$.
11. Маса двох вимірюваних аніонів $SO_4^{2-} + Cl^- = (140+75) \cdot 2500/10^6 = 0.5375 \text{ кг}$.
12. Висновок: розрахунки окремих можливих осадів не є прямим прогнозом фактичних висолів або нормативною оцінкою агресивності води.

Перевірочний підсумок повного прикладу

Порівняйте розраховані вихідні й кінцеві маси, молярні співвідношення або геометричний об'єм. Числові розбіжності припустимі лише через зазначене округлення; різницю слід пояснити фізично.

5. СПІЛЬНІ ЗАВДАННЯ ДЛЯ ВСІХ 30 СТУДЕНТІВ

Обов'язково: блок А — повний наскрізний розрахунок за індивідуальними даними; блок Б — пов'язана зміна умов; блок В — незалежна перевірка та фаховий висновок.

А. Основний комплексний розрахунок

1. Перевести об'єм води в літри.
2. Визначити кальцієву та магнієву жорсткість у ммоль/л.
3. Знайти загальну жорсткість у ммоль/л та ммоль-екв/л.
4. Обчислити загальні маси Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Cl^- та HCO_3^- у відібраному об'ємі.
5. Знайти молярну концентрацію SO_4^{2-} та обмежувальний реагент у гіпсовій моделі.
6. Обчислити можливу верхню масу дигідрату сульфату кальцію (окремий сценарій).
7. Знайти молярну концентрацію HCO_3^- та обмежувальний реагент у карбонатній моделі.
8. Обчислити можливу верхню масу CaCO_3 (інший незалежний сценарій).
9. Оцінити масу двох вимірюваних аніонів у воді, не називаючи її масою солей.
10. Для незалежної умовно підкисленої проби обчислити стехіометричну масу $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Б. Перевірка альтернативної виробничої ситуації (27 хв)

1. За збільшення об'єму тієї самої води в 1,4 раза повторити маси йонів, не змінюючи концентрацій і жорсткості.
2. За зростання концентрації Ca^{2+} на 20 % перерахувати жорсткість та окремі верхні межі осадів.
3. Порівняти верхні маси гіпсу й CaCO_3 , пояснивши, чому їхнє одночасне випадіння не доведено.
4. Скласти перелік даних, без яких неможливо встановити за нормативами допустимість води для бетону або клас агресивності середовища.

В. Обов'язкові перевірки та висновок (15 хв)

1. Перевірити перехід $\text{мг/л} \rightarrow \text{кг}$ і $\text{ммоль/л} \rightarrow \text{ммоль-екв/л}$.
2. Показати, де застосовано $\min()$ для обмежувального йона; не додавати дві окремі верхні оцінки як фактичний осад.
3. Вказати межі висновку за лише п'ятьма вимірюваними йонами без рН, лужності, температури та реальних умов контакту з конструкцією.

30 індивідуальних варіантів вихідних даних

У кожній таблиці використовуйте той самий номер рядка. Відсотки перетворюйте на частки одиниці; маси та довжини переводьте до погоджених у формулах одиниць. Таблиці задають навчальні, а не виробничі параметри.

Вихідні дані — частина 1 із 2

№	V, м³	Ca²⁺, мг/л	Mg²⁺, мг/л	SO₄²⁻, мг/л	Cl⁻, мг/л
1	1.12	50	15	95	45
2	1.24	55	18	110	55
3	1.36	60	21	125	65
4	1.48	65	24	140	75
5	1.60	70	27	155	85
6	1.72	75	30	170	95

№	V, м³	Ca ²⁺ , мг/л	Mg ²⁺ , мг/л	SO ₄ ²⁻ , мг/л	Cl ⁻ , мг/л
7	1.84	80	33	185	105
8	1.96	85	36	200	115
9	2.08	90	39	215	125
10	2.20	95	12	230	135
11	2.32	100	15	80	145
12	2.44	105	18	95	35
13	2.56	45	21	110	45
14	2.68	50	24	125	55
15	2.80	55	27	140	65
16	2.92	60	30	155	75
17	3.04	65	33	170	85
18	3.16	70	36	185	95
19	3.28	75	39	200	105
20	3.40	80	12	215	115
21	3.52	85	15	230	125
22	3.64	90	18	80	135
23	3.76	95	21	95	145
24	3.88	100	24	110	35
25	4.00	105	27	125	45
26	4.12	45	30	140	55
27	4.24	50	33	155	65
28	4.36	55	36	170	75
29	4.48	60	39	185	85
30	4.60	65	12	200	95

Вихідні дані — частина 2 із 2

№	HCO ₃ ⁻ , мг/л	кислотн., ммоль/л
1	100	0.4
2	110	0.5
3	120	0.6
4	130	0.7
5	140	0.8
6	150	0.9
7	160	1.0
8	170	1.1
9	180	0.3
10	190	0.4
11	200	0.5
12	210	0.6
13	220	0.7
14	90	0.8
15	100	0.9

№	HCO_3^- , мг/л	кислотн., ммоль/л
16	110	1.0
17	120	1.1
18	130	0.3
19	140	0.4
20	150	0.5
21	160	0.6
22	170	0.7
23	180	0.8
24	190	0.9
25	200	1.0
26	210	1.1
27	220	0.3
28	90	0.4
29	100	0.5
30	110	0.6

6. Таблиця результатів для звіту

Заповніть за власним варіантом; укажіть одиниці, формулу і перевірку. Для зміненого сценарію Б запишіть окремий підсумок.

Контрольна величина	Мій результат	Одиниця / перевірка
загальна жорсткість, ммоль/л	_____	_____
загальна жорсткість, ммоль-екв/л	_____	_____
Ca^{2+} у партії, кг	_____	_____
SO_4^{2-} у партії, кг	_____	_____
Cl^- у партії, кг	_____	_____
максимум гіпсу, кг	_____	_____
максимум CaCO_3 , кг	_____	_____
$\text{Ca}(\text{OH})_2$ для окремої проби, кг	_____	_____

7. Типові помилки та правила перевірки

Не плутати ммоль/л двовалентних катіонів із ммоль-екв/л; другий показник удвічі більший.

Не переводити всі солі у вигляд CaCO_3 без указання, що це лише умовна форма вираження жорсткості.

Не підсумовувати максимальні маси двох альтернативних осадів, розрахованих із тієї самої порції Ca^{2+} .

Не робити нормативного висновку про агресивність води лише за окремими йонами та без характеристик конструкції.

8. Контрольні питання і висновок

- Чим відрізняються тимчасова й постійна жорсткість води?
- Які процеси можуть спричинити висоли на кладці та бетоні?
- Чому сульфати і хлориди мають різні механізми впливу на бетон і сталь?
- Які додаткові дані потрібні, щоб кваліфікувати агресивність води за чинними вимогами?

Шаблон висновку: «Для варіанта № __ визначено ..., порівняно ..., перевірено У межах прийнятої моделі результат означає Для реального вибору матеріалу/рішення додатково потрібні ...».

Опорні джерела: [7, розд. 7–8, с. 120, 146–151; 9, гл. 2, с. 28–81; 8, розд. 5–6]

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 8

Розрахунок корозійних втрат арматури та витрати матеріалів для протикорозійного захисту

Мета:

Оцінити масовий показник корозії лабораторного зразка арматурної сталі та перерахувати його в умовну рівномірну втрату товщини; виконати окремий баланс захисного покриття зовнішнього сталевих елементів.

Єдина виробнича/навчальна ситуація. НАВЧАЛЬНА МОДЕЛЬ. Для двох однакових лабораторних сталевих стрижнів наведено втрати маси за час експозиції в умовному електроліті: один зразок без захисту, інший із застосуванням у випробуванні захисним чинником. Порівняйте показники. Окремо за тією самою геометрією обчисліть масу лакофарбового покриття зовнішнього сталевих елементів; розрахунок не є рекомендацією фарбувати арматуру, якщо це може порушити її зчеплення з бетоном.

1. Теоретичні відомості

Арматурна сталь у непошкоджені лужному бетоні зазвичай перебуває в пасивному стані. Карбонізація цементного каменю, проникнення хлоридів, тріщини та доступ вологи можуть змінювати електрохімічні умови і сприяти корозії. Оцінка потребує відомостей про матеріал, середовище і стан конструкції; одна втрата маси не дає повної картини локальних уражень [9, с. 70–81; 8, розд. 4–6].

Гравіметричний метод визначає зміну маси зразка за відомої площі та часу. Для навчального прикладу вважаємо, що масу очищено від продуктів корозії за однаковою процедурою і що втрачений метал — залізо. Геометрію моделюємо бічною поверхнею циліндра, торці не враховуємо.

Середню глибину втрати металу визначають із відношення втраченої маси до густини та площі. Перерахунок у мм/рік означає умовне лінійне продовження лабораторного показника; це не прогноз фактичної довговічності через нерівномірність корозії, зміну умов і можливу наявність пітингів [8, розд. 2, 9].

Електрохімічний баланс $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$ дає кількість заряду, еквівалентну масі розчиненого заліза за законом Фарадея. Поділ на час дає лише ідеалізований середній еквівалентний струм за прийнятим двоелектронним процесом, а не безпосередньо виміряний струм у бетоні.

Порівняння незахищеного й умовно захищеного зразків проводять за однакової площі та тривалості. Обчислена частка зменшення масового показника характеризує лише наведені результати випробування і не гарантує такого самого ефекту в іншому середовищі або на реальній конструкції.

Для зовнішніх сталевих елементів пасивні захисні покриття можуть створювати бар'єр між металом та середовищем. Розрахунок за площею, сухою товщиною, густиною сухої плівки, масовою часткою сухого залишку та технологічними втратами дає навчальну потребу в матеріалі. Реальні системи підбирають за сумісністю, підготовкою поверхні та паспортом виробника [8, розд. 11; 7, с. 198–200].

2. Хімічні рівняння та припущення

Анодний процес (модель): $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$.

Катодний процес в аерованому нейтральному/лужному електроліті: $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$.

Моделльний стехіометричний баланс жертвенного Zn: $Zn \rightarrow Zn^{2+} + 2e^-$; наведено тільки для порівняння еквівалентів, не для проєктування катодного захисту.

Довжина L — м; d — мм; площа A — м²; масова втрата Δm — г; t — год; густина сталі $\rho_{Fe}=7850$ кг/м³; M(Fe)=55,845, M(Zn)=65,38 г/моль; F=96485 Кл/моль; 1 рік умовно = 8760 год. Суха товщина δ подана в мм.

3. Формули для самостійного розрахунку

Як читати та застосовувати формули. Усі позначення використовують тільки для визначеної тут моделі. Спочатку розрахуйте масу чистих компонентів і стехіометрію; далі — реальні частки перетворення, втрати й об'ємні або поверхневі показники. Не додавайте різні величини та не використовуйте навчальний баланс як норму складу матеріалу.

$$A = \pi \cdot (d/1000) \cdot L \quad (8.1)$$

Пояснення до формули (8.1). Для циліндричного зразка враховано тільки бічну змочувану поверхню; торці в моделі не контактують з електролітом.

$$V(\text{стрижня}) = \pi \cdot (d/2000)^2 \cdot L \quad (8.2)$$

Пояснення до формули (8.2). Геометричний об'єм початкового стрижня потрібний для умовної оцінки початкової маси.

$$m(\text{поч., кг}) = V(\text{стрижня}) \cdot 7850 \quad (8.3)$$

Пояснення до формули (8.3). Застосовано умовну сталу густину сталі; реальний сортament і допуски тут не враховані.

$$k_m(\text{без зах.}) = \Delta m_b / (A \cdot t) \quad (8.4)$$

Пояснення до формули (8.4). Гравіметричний показник має одиниці г/(м²·год); поверхня й експозиція мають бути однаковими під час порівняння.

$$k_m(\text{зах.}) = \Delta m_z / (A \cdot t) \quad (8.5)$$

Пояснення до формули (8.5). Розрахунок аналогічний, але за експериментально заданою втратою маси умовно захищеного зразка.

$$\eta(\text{порівн.}) = 1 - k_m(\text{зах.}) / k_m(\text{без зах.}) \quad (8.6)$$

Пояснення до формули (8.6). Частка характеризує зменшення середнього масового показника тільки в наведеному навчальному випробуванні.

$$v(\text{мм/рік}) = (\Delta m/1000) / (7850 \cdot A) \cdot 1000 \cdot (8760/t) \quad (8.7)$$

Пояснення до формули (8.7). Спочатку знаходимо еквівалентну рівномірну втрату товщини, після чого виконуємо умовний річний перерахунок.

$$n(\text{Fe, моль}) = \Delta m(\text{г}) / 55,845 \quad (8.8)$$

Пояснення до формули (8.8). Для електрохімічної моделі всю втрату маси приписуємо Fe; реальна сталь містить інші елементи.

$$Q(\text{Кл}) = 2 \cdot F \cdot n(\text{Fe}) \quad (8.9)$$

Пояснення до формули (8.9). Два електрони на моль Fe у прийнятому анодному процесі. Струм в реальному середовищі може змінюватися з часом.

$$I(A) = Q / (3600 \cdot t) \quad (8.10)$$

Пояснення до формули (8.10). Еквівалентний середній струм у навчальній моделі; це не результат прямого електрохімічного вимірювання.

$$m(\text{Zn, теор. екв.}) = [\Delta m_{\text{б}} - \Delta m_{\text{з}}] \cdot (65,38/55,845) \quad (8.11)$$

Пояснення до формули (8.11). Двоелектронна еквівалентність умовно збереженої маси Fe та втраченої Zn; на практиці ефективність інша й потребує окремих розрахунків.

$$m(\text{суха плівка, кг}) = A \cdot (\delta/1000) \cdot \rho_{\text{пл}} \quad (8.12)$$

Пояснення до формули (8.12). Окрема модель покриття зовнішнього сталевго елемента заданої площі. Не вважати її правилом покриття арматури в бетоні.

$$m(\text{матеріалу, кг}) = m(\text{суха плівка}) / [\varphi \cdot (1 - \ell)] \quad (8.13)$$

Пояснення до формули (8.13). φ — частка сухого залишку товарної фарби, ℓ — частка технологічних втрат від придбаного матеріалу.

Усі частки ρ , η , α , β , w , d , φ , ℓ у розрахункових формулах виражені одиницями, якщо не вказано %. Перед підстановкою переведіть відсотки в частки: 5 % = 0,05. Нумерація формул діє лише в межах цієї роботи.

4. Організація обчислень та розв'язаний приклад

Повністю розібраний зразок

Показані всі основні підстановки за одним узгодженим навчальним набором. Під час виконання власного варіанта використовуйте той самий порядок, зокрема перевірки незалежним способом.

Вихідні дані прикладу: сталевий лабораторний стрижень $L=12$ м, $d=16$ мм; Δm без захисту 28 г, із захистом 8 г, $t=720$ год; умовна суха плівка на зовнішньому сталевому елементі товщиною 0,20 мм, густина 1200 кг/м³, сухий залишок фарби 60 %, втрати 15 %.

1. $A = \pi \cdot (16/1000) \cdot 12 = 0.6032 \text{ м}^2$.
2. Об'єм стрижня $= \pi \cdot (0,016/2)^2 \cdot 12 = 0.002413 \text{ м}^3$; початкова маса ≈ 18.94 кг.
3. $k_m(\text{без зах.}) = 28/(0.6032 \cdot 720) = 0.0645 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$.
4. $k_m(\text{із зах.}) = 8/(0.6032 \cdot 720) = 0.0184 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$.
5. Порівняльне зменшення показника $= (1 - 8/28) \cdot 100 \% = 71.43 \%$.
6. Умовна рівномірна втрата без захисту $= 0.0719$ мм/рік; за умовного захисту $= 0.0206$ мм/рік.
7. $n(\text{Fe})$ для втрати 28 г $= 28/55,845 = 0.5014$ моль.
8. Еквівалентний заряд $Q = 2 \cdot 96485 \cdot 0.5014 = 96753$ Кл.
9. Еквівалентний середній струм $I = 96753/(720 \cdot 3600) = 0.0373$ А.
10. Ідеально еквівалентна маса Zn для різниці втрат $= (28 - 8) \cdot 65,38/55,845 = 23.41$ г (не проєктний показник).
11. Суха плівка на зовнішньому елементі $= 0.6032 \cdot 0,00020 \cdot 1200 = 0.1448$ кг.
12. Товарна фарба з урахуванням залишку і втрат $= 0.1448/[0,60 \cdot (1 - 0,15)] = 0.2839$ кг.

Перевірочний підсумок повного прикладу

Порівняйте розраховані вихідні й кінцеві маси, молярні співвідношення або геометричний об'єм. Числові розбіжності припустимі лише через зазначене округлення; різницю слід пояснити фізично.

5. СПІЛЬНІ ЗАВДАННЯ ДЛЯ ВСІХ 30 СТУДЕНТІВ

Обов'язково: блок А — повний наскрізний розрахунок за індивідуальними даними; блок Б — пов'язана зміна умов; блок В — незалежна перевірка та фаховий висновок

А. Основний комплексний розрахунок

1. Визначити бічну змочувану площу та початковий об'єм сталевго зразка.
2. Оцінити початкову масу сталі за прийнятої густини.
3. Обчислити гравіметричний показник корозії незахищеного зразка.
4. Обчислити відповідний показник для умовно захищеного зразка.
5. Визначити відносну зміну масового показника між двома зразками.
6. Перерахувати обидва масові показники у модельну рівномірну втрату товщини мм/рік.
7. За втратою маси незахищеного зразка знайти кількість розчиненого Fe.
8. Знайти електричний заряд і еквівалентний середній струм за двоелектронною моделлю.
9. Оцінити ідеально еквівалентну масу Zn для різниці втрат (навчальне порівняння).
10. Для окремого зовнішнього сталевго елемента цієї геометрії розрахувати суху та закупівельну масу лакофарбового матеріалу.

Б. Перевірка альтернативної виробничої ситуації

1. Якщо тривалість тієї самої експозиції збільшити на 25 % за незмінного середнього k_m , перерахувати прогнозну масову втрату за тієї самої площі.
2. Для сухої плівки, збільшеної на 0,05 мм, визначити додаткову теоретичну потребу в матеріалі.
3. Порівняти закупівельну потребу за початкових втрат та після їхнього збільшення на 5 процентних пунктів.
4. Назвати параметри бетонного захисного шару, яких немає в задачі й без яких неможливо визначити ризик корозії арматури реальної конструкції.

В. Обов'язкові перевірки та висновки

1. Перевірити одиниці площі, густини й часу (мм→м; г→кг; год→рік).
2. Перевірити, що показник зменшення корозії лежить від 0 до 1 для обраної пари втрат.
3. Пояснити, чому середня втрата товщини не виключає небезпечних локальних пітингів.

30 індивідуальних варіантів вихідних даних

У кожній таблиці використовуйте той самий номер рядка. Відсотки перетворюйте на частки одиниці; маси та довжини переводьте до погоджених у формулах одиниць. Таблиці задають навчальні, а не виробничі параметри.

Вихідні дані — частина 1 із 2

№	L, м	d, мм	втрата б., г	втрата з., г	t, год
1	9	12	20	5.0	420
2	10	14	22	6.6	480
3	11	16	24	8.4	540

№	L, м	d, мм	втрата б., г	втрата з., г	t, год
4	12	18	26	10.4	600
5	13	20	28	12.6	660
6	14	10	30	6.0	720
7	15	12	32	8.0	780
8	16	14	34	10.2	840
9	17	16	36	12.6	900
10	18	18	38	15.2	960
11	19	20	40	18.0	1020
12	20	10	42	8.4	360
13	21	12	44	11.0	420
14	22	14	46	13.8	480
15	23	16	48	16.8	540
16	24	18	50	20.0	600
17	25	20	52	23.4	660
18	26	10	54	10.8	720
19	27	12	56	14.0	780
20	28	14	58	17.4	840
21	29	16	60	21.0	900
22	30	18	62	24.8	960
23	31	20	64	28.8	1020
24	32	10	66	13.2	360
25	33	12	68	17.0	420
26	34	14	70	21.0	480
27	35	16	72	25.2	540
28	36	18	74	29.6	600
29	37	20	76	34.2	660
30	38	10	78	15.6	720

Вихідні дані — частина 2 із 2

№	δ, мм	ρ плівки, кг/м³	φ фарби, %	втрати t, %
1	0.17	1125	53	12
2	0.19	1150	56	14
3	0.21	1175	59	16
4	0.23	1200	62	18
5	0.25	1225	65	20
6	0.27	1250	68	22
7	0.29	1100	71	24
8	0.15	1125	50	10
9	0.17	1150	53	12
10	0.19	1175	56	14
11	0.21	1200	59	16
12	0.23	1225	62	18

№	δ, мм	ρ плівки, кг/м³	φ фарби, %	втрати ℓ, %
13	0.25	1250	65	20
14	0.27	1100	68	22
15	0.29	1125	71	24
16	0.15	1150	50	10
17	0.17	1175	53	12
18	0.19	1200	56	14
19	0.21	1225	59	16
20	0.23	1250	62	18
21	0.25	1100	65	20
22	0.27	1125	68	22
23	0.29	1150	71	24
24	0.15	1175	50	10
25	0.17	1200	53	12
26	0.19	1225	56	14
27	0.21	1250	59	16
28	0.23	1100	62	18
29	0.25	1125	65	20
30	0.27	1150	68	22

6. Таблиця результатів для звіту

Заповніть за власним варіантом; укажіть одиниці, формулу і перевірку. Для зміненого сценарію Б запишіть окремий підсумок.

Контрольна величина	Мій результат	Одиниця / перевірка
площа, м²	_____	_____
втрата без зах., г/(м²·год)	_____	_____
втрата із зах., г/(м²·год)	_____	_____
зменшення показника, %	_____	_____
модельна втрата товщини, мм/рік	_____	_____
еквівалентний Q, Кл	_____	_____
суха плівка, кг	_____	_____
потреба товарної фарби, кг	_____	_____

7. Типові помилки та правила перевірки

Не підставляти діаметр у міліметрах у формулу, яка вимагає метри.

Не екстраполювати лабораторні значення мм/рік на строк служби реального залізобетону.

Не називати еквівалентний заряд фактично виміряним струмом корозії.

Не переносити схему зовнішнього лакофарбового покриття автоматично на арматуру, для якої важливе зчеплення з бетоном.

8. Контрольні питання і висновок

- Чому арматура може пасивуватися в непошкодженому лужному цементному камені?
- Які процеси можуть порушити цей пасивний стан?
- Чому однакова середня масова втрата не гарантує однакової небезпеки локального пошкодження?
- Чим відрізняються бар'єрне покриття сталевих конструкцій та захист арматури її бетонним оточенням?

Шаблон висновку: «Для варіанта № __ визначено ..., порівняно ..., перевірено У межах прийнятої моделі результат означає Для реального вибору матеріалу/рішення додатково потрібні ...».

Опорні джерела: [8, розд. 2, 4–6, 9, 11; 9, гл. 2, с. 70–81; 7, розд. 9, с. 198–200]

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 9

Матеріальний баланс ремонтного й гідроізоляційного захисту: полімери, покриття та рулонні матеріали

Мета:

Розрахувати послідовний матеріальний баланс ремонтного розчину, ґрунтування, багатошарової полімерної гідроізоляції та рулонного покриття для умовної поверхні бетонної конструкції.

Єдина виробнича/навчальна ситуація. НАВЧАЛЬНА МОДЕЛЬ. Задана площа бетонної поверхні з тріщинами потребує ремонту, ґрунтування та гідроізоляції. Площа нанесення збільшується на задану частку нахлестів і технологічних додаткових ділянок. Двошарове покриття задане сухими товщинами, густиною сухої плівки й масовою часткою сухого залишку. Окремо для тієї самої площі оцінюють рулонну систему; два типи гідроізоляції в задачі порівнюють як альтернативи, а не накладають автоматично разом.

1. Теоретичні відомості

Полімерні, бітумні та комбіновані гідроізоляційні матеріали мають різний механізм формування шару. Для полімерної композиції важливі співвідношення в'язучого, розчинника/води, сухого залишку й товщини висохлої плівки. Для бітумних рулонних матеріалів істотна кількість полотен, розміри рулону й нахлести [7, розд. 13–14, с. 284–341].

Пошкодження бетону й тріщини потребують обстеження перед ремонтом. Метод заповнення залежить від причини та рухливості тріщини, стану основи, вологості, сумісності матеріалів та експлуатаційних умов. У навчальному розрахунку заданий геометричний об'єм умовної ремонтної порожнини; реальну технологію ремонту з цього об'єму не визначають [9, гл. 3–6]. Площа Аеф приймається рівною геометричній площі з урахуванням окремо заданої частки додаткових ділянок. Така поправка не замінює фактичного обміру або обчислення площі складних вузлів і примикань.

Маса сухої плівки дорівнює об'єму шару, помноженому на густину сухої речовини. Якщо товарна фарба містить 65 % сухого залишку за масою, для одержання необхідної сухої маси її витрата більша, ніж сама суха маса; технологічні втрати збільшують закупівельну потребу. Об'ємна частка твердих речовин і масова частка сухого залишку — різні показники, їх не можна плутати.

Для ґрунтування задаємо витрату товарного матеріалу на 1 м², а для ремонтного розчину — густину готової суміші та втрати при використанні. Масу полімерного компонента визначаємо лише за умовною часткою товарної ремонтної суміші; фактичне дозування беруть із документації матеріалу.

Для рулонного покриття використаємо розміри рулону після віднімання умовних нахлестів у двох напрямках. Ділення загальної ефективної площі на корисну площу рулону з округленням угору дає нижню навчальну оцінку кількості цілих рулонів. Розкрій у реальних примиканнях може дати більше відходів [7, с. 284–303].

Показники закупівлі не є технологічною картою. Вибір захисної системи потребує даних про водяний тиск, характер тріщин, деформації, сумісність шарів, підготовку поверхні, вимоги до зчеплення та паспорти матеріалів [9, гл. 5–6].

2. Хімічні рівняння та припущення

Реакції твердіння полімерних сумішей можуть бути різними: полімеризація, поліконденсація, випаровування води/розчинника або комбінований механізм. Єдиного стехіометричного рівняння для всіх матеріалів немає.

Для цементного ремонтного матеріалу хімічну основу становить гідратація мінеральних фаз цементу; геометричний баланс заповнення тріщини не визначає ступінь її гідратації.

Матеріальний баланс сухої плівки: маса закупленої композиції $\times$ (1–втрати нанесення) $\times$ (масова частка сухого залишку) = маса сухої плівки.

A — m^2 ; товщини δ — mm ; площа перерізу тріщини ширина $\times$ глибина у m ; густина сухого покриття ρ_p та ремонтної суміші ρ_r — kg/m^3 ; ϕ і ℓ — частки одиниці; витрата ґрунтовки q_g — kg/m^2 ; розміри рулону й нахлисти — m . Для всіх 30 індивідуальних варіантів прийняти рулон шириною 1,00 m і довжиною 10,00 m , нахлист уздовж ширини 0,10 m і вздовж довжини 0,20 m . Навчальні значення не є витратами конкретного виробника.

3. Формули для самостійного розрахунку

Як читати та застосовувати формули. Усі позначення використовують тільки для визначеної тут моделі. Спочатку розрахуйте масу чистих компонентів і стехіометрію; далі — реальні частки перетворення, втрати й об'ємні або поверхневі показники. Не додавайте різномірні величини та не використовуйте навчальний баланс як норму складу матеріалу.

$$A_{ef} = A \cdot (1 + o) \quad (9.1)$$

Пояснення до формули (9.1). o — додаткова площа нахлестів, примикань і зон технологічного перекриття; ця надбавка застосовується у зазначених нижче формулах.

$$\delta_{sum}(m) = (\delta_1 + \delta_2) / 1000 \quad (9.2)$$

Пояснення до формули (9.2). Складають саме задані сухі товщини двох шарів; перед множенням на площу переводять міліметри в метри.

$$V(\text{плівки}, m^3) = A_{ef} \cdot \delta_{sum} \quad (9.3)$$

Пояснення до формули (9.3). Геометричний об'єм готової сухої плівки без урахування додаткового заповнення пор у бетоні.

$$m(\text{суха плівка}, kg) = V(\text{плівки}) \cdot \rho_p \quad (9.4)$$

Пояснення до формули (9.4). ρ_p — густина вже сформованого сухого матеріалу, а не густина сирієї композиції.

$$m(\text{нанесеної композиції}) = m(\text{суха плівка}) / \phi \quad (9.5)$$

Пояснення до формули (9.5). ϕ — масова частка сухих речовин у товарній композиції; зменшення ϕ збільшує масу вихідного матеріалу.

$$m(\text{закупівлі покриття}) = m(\text{суха плівка}) / [\phi \cdot (1 - \ell)] \quad (9.6)$$

Пояснення до формули (9.6). ℓ — частка закупленого матеріалу, втрачена в процесі нанесення. Втрати не слід додавати вдруге.

$$m(\text{ґрунтовки}) = A_{ef} \cdot q_g \quad (9.7)$$

Пояснення до формули (9.7). q_g — задана витрата товарної ґрунтовки на площу; заздалегідь урахуйте ті самі примикання, щоб не подвоїти коефіцієнт o .

$$m(\text{сухої ґрунтовки}) = m(\text{ґрунтовки}) \cdot \phi_g \quad (9.8)$$

Пояснення до формули (9.8). ϕ_g — масова частка сухого залишку окремо заданої ґрунтовки.

$$V(\text{тріщини}) = L_{\text{тр}} \cdot (b/1000) \cdot (h/1000) \quad (9.9)$$

Пояснення до формули (9.9). Для прямокутної умовної порожнини перемножують сумарну довжину, ширину і глибину. Реальні тріщини можуть мати змінний переріз.

$$m(\text{ремонтного розчину, нетто}) = V(\text{тріщини}) \cdot \rho_r \quad (9.10)$$

Пояснення до формули (9.10). Обчислена геометрична маса не враховує витрат заповнення, змішування або втрат під час транспортування.

$$m(\text{ремонтного розчину, закуп.}) = m(\text{нетто}) / (1 - \ell_r) \quad (9.11)$$

Пояснення до формули (9.11). ℓ_r — втрати саме ремонтного матеріалу, а не гідроізоляційного покриття.

$$m(\text{полімерного компонента}) = m(\text{ремонтного розчину, закуп.}) \cdot \rho_{\text{пол}} \quad (9.12)$$

Пояснення до формули (9.12). Умовна частка $\rho_{\text{пол}}$ задана від закупленої маси ремонтної суміші; паспортні рецептури продукту можуть бути іншими.

$$A(\text{рулону, корисна}) = (B - b_{\text{нахл}}) \cdot (L_r - l_{\text{нахл}}) \quad (9.13)$$

Пояснення до формули (9.13). Нахлисти віднімаються від номінальної ширини й довжини рулону; формула є спрощеною геометричною оцінкою.

$$N(\text{рулонів}) = \text{ceil}[A_{\text{еф}}/A(\text{рулону, корисна})] \quad (9.14)$$

Пояснення до формули (9.14). Кількість рулонів округлюють до більшого цілого числа; не слід округлювати окремі проміжні площі.

$$\Delta m(\text{закуп.}) = A_{\text{еф}} \cdot (\Delta \delta / 1000) \cdot \rho_{\text{п}} / [\varphi \cdot (1 - \ell)] \quad (9.15)$$

Пояснення до формули (9.15). Для сценарію збільшення сухої товщини на $\Delta \delta$ визначаємо додаткову закупівельну потребу за незмінних складу і втрат.

Усі частки ρ , η , α , β , w , d , φ , ℓ у розрахункових формулах виражені одиницями, якщо не вказано %. Перед підстановкою переведіть відсотки в частки: 5 % = 0,05. Нумерація формул діє лише в межах цієї роботи.

4. Організація обчислень та розв'язаний приклад

Повністю розібраний зразок

Показані всі основні підстановки за одним узгодженим навчальним набором. Під час виконання власного варіанта використайте той самий порядок, зокрема перевірки незалежним способом.

Вихідні дані прикладу: бетонна поверхня 150 м²; додаткова площа 7 %; два сухі шари 0,25 і 0,35 мм; суха густина 1100 кг/м³; сухий залишок 65 %, втрати 12 %; ґрунтовка 0,18 кг/м², сухий залишок 25 %; тріщина 30 м × 3 мм × 20 мм; густина ремонтної суміші 1800 кг/м³, втрати 10 %, умовний полімерний компонент 12 %; рулон 1×10 м, нахлисти 0,10 м за шириною й 0,20 м за довжиною.

1. $A_{\text{еф}} = 150 \cdot 1,07 = 160.50 \text{ м}^2$.
2. Сумарна суха товщина = $(0,25 + 0,35) / 1000 = 0.000600 \text{ м}$.
3. Об'єм сухої плівки = $160.50 \cdot 0,00060 = 0.09630 \text{ м}^3$.
4. Маса сухої плівки = $0.09630 \cdot 1100 = 105.93 \text{ кг}$.
5. Маса композиції, що має потрапити на основу = $105.93 / 0,65 = 162.97 \text{ кг}$.
6. Закупити покриття: $105.93 / (0,65 \cdot 0,88) = 185.19 \text{ кг}$.
7. Товарна ґрунтовка: $160.50 \cdot 0,18 = 28.89 \text{ кг}$; сухий залишок = 7.22 кг.

8. Об'єм ремонтної порожнини $= 30 \cdot 0,003 \cdot 0,020 = 0.001800 \text{ м}^3$.
9. Чиста маса ремонтної суміші $= 0.001800 \cdot 1800 = 3.24 \text{ кг}$.
10. Закупівельна маса суміші $= 3.24/0,90 = 3.60 \text{ кг}$; умовний полімерний компонент $= 0.432 \text{ кг}$.
11. Корисна площа рулону $= (1-0,10) \cdot (10-0,20) = 8.82 \text{ м}^2$; потрібно $\text{ceil}(160.50/8.82) = 19$ рулонів.
12. Якщо суху товщину збільшити на 0,10 мм, додатковий об'єм $= 160.50 \cdot 0,00010 = 0.01605 \text{ м}^3$, а закупівля зросте на 30.87 кг.

Перевірочний підсумок повного прикладу

Порівняйте розраховані вихідні й кінцеві маси, молярні співвідношення або геометричний об'єм. Числові розбіжності припустимі лише через зазначене округлення; різницю слід пояснити фізично.

5. СПІЛЬНІ ЗАВДАННЯ ДЛЯ ВСІХ 30 СТУДЕНТІВ

Обов'язково: блок А — повний наскрізний розрахунок за індивідуальними даними; блок Б — пов'язана зміна умов; блок В — незалежна перевірка та фаховий висновок.

А. Основний комплексний розрахунок

1. За основною площею та надбавкою знайти площу нанесення гідроізоляції й ґрунтовки.
2. Перевести задані товщини кожного сухого шару в метри та знайти їхню суму.
3. Обчислити геометричний об'єм двошарової сухої плівки.
4. Обчислити її масу за заданої густини сухого матеріалу.
5. Знайти масу товарної композиції, яку потрібно реально нанести для отримання сухої плівки.
6. За часткою технологічних втрат визначити закупівельну масу гідроізоляційного матеріалу.
7. Визначити масу товарної ґрунтовки й масу її сухого залишку.
8. За сумарною довжиною, шириною і глибиною тріщини розрахувати геометричний об'єм ремонту.
9. Знайти масу ремонтного матеріалу нетто, закупівельну масу і умовну масу полімерного компонента.
10. Для альтернативної рулонної системи знайти корисну площу рулону та потрібну кількість цілих рулонів.

Б. Перевірка альтернативної виробничої ситуації

1. За збільшення сухої товщини другого шару на 0,10 мм визначити додаткову потребу в товарній композиції.
2. За зростання технологічних втрат гідроізоляції на 5 процентних пунктів перерахувати закупівлю без зміни сухої маси.
3. За збільшення загальної довжини тріщин у 1,5 раза перерахувати об'єм і закупівельну масу ремонту.
4. Порівняти покривну та рулонну гідроізоляцію тільки за кількістю матеріалу у власній навчальній моделі; назвати додаткові дані для технічного вибору.

В. Обов'язкові перевірки та висновок

1. Перевірити, що суха маса не більша від маси композиції, яка потрапила на поверхню.
2. Перевірити, що закупівля ремонтного розчину та гідроізоляції більша за відповідні чисті витрати при додатних втратах.
3. Визначити, які твердження щодо довговічності ремонту не можна зробити без обстеження тріщин, сумісності матеріалів і паспортних вимог.

30 індивідуальних варіантів вихідних даних

У кожній таблиці використовуйте той самий номер рядка. Відсотки перетворюйте на частки одиниці; маси та довжини переводьте до погоджених у формулах одиниць.

Таблиці задають навчальні, а не виробничі параметри.

Вихідні дані — частина 1 із 3

№	площа А, м²	дод. площа о, %	шар 1, мм	шар 2, мм	ρ сух., кг/м³
1	95	5	0.20	0.31	1040
2	100	6	0.22	0.34	1080
3	105	7	0.24	0.37	1120
4	110	8	0.26	0.40	1160
5	115	9	0.28	0.43	1200
6	120	10	0.30	0.46	1240
7	125	11	0.18	0.28	1000
8	130	4	0.20	0.31	1040
9	135	5	0.22	0.34	1080
10	140	6	0.24	0.37	1120
11	145	7	0.26	0.40	1160
12	150	8	0.28	0.43	1200
13	155	9	0.30	0.46	1240
14	160	10	0.18	0.28	1000
15	165	11	0.20	0.31	1040
16	170	4	0.22	0.34	1080
17	175	5	0.24	0.37	1120
18	180	6	0.26	0.40	1160
19	185	7	0.28	0.43	1200
20	190	8	0.30	0.46	1240
21	195	9	0.18	0.28	1000
22	200	10	0.20	0.31	1040
23	205	11	0.22	0.34	1080
24	210	4	0.24	0.37	1120
25	215	5	0.26	0.40	1160
26	220	6	0.28	0.43	1200
27	225	7	0.30	0.46	1240
28	230	8	0.18	0.28	1000

№	площа А, м²	дод. площа о, %	шар 1, мм	шар 2, мм	ρ сух., кг/м³
29	235	9	0.20	0.31	1040
30	240	10	0.22	0.34	1080

Вихідні дані — частина 2 із 3

№	сух. зал. ф, %	втрата покр., %	ґрунт., кг/м²	ф ґрунт., %	тріщ., L, м
1	58	10	0.14	23	18
2	61	12	0.16	26	20
3	64	14	0.18	29	22
4	67	16	0.20	32	24
5	70	18	0.22	35	26
6	73	20	0.24	38	28
7	55	8	0.12	20	30
8	58	10	0.14	23	32
9	61	12	0.16	26	34
10	64	14	0.18	29	36
11	67	16	0.20	32	38
12	70	18	0.22	35	40
13	73	20	0.24	38	42
14	55	8	0.12	20	44
15	58	10	0.14	23	46
16	61	12	0.16	26	48
17	64	14	0.18	29	50
18	67	16	0.20	32	52
19	70	18	0.22	35	54
20	73	20	0.24	38	56
21	55	8	0.12	20	58
22	58	10	0.14	23	60
23	61	12	0.16	26	62
24	64	14	0.18	29	64
25	67	16	0.20	32	66
26	70	18	0.22	35	68
27	73	20	0.24	38	70
28	55	8	0.12	20	72
29	58	10	0.14	23	74
30	61	12	0.16	26	76

Вихідні дані — частина 3 із 3

№	ширина, мм	глибина, мм	ρ рем., кг/м³	втрата рем., %	полімер, %
1	3	12	1750	8	9

№	ширина, мм	глибина, мм	ρ рем., кг/м³	втрата рем., %	полімер, %
2	4	14	1800	9	10
3	5	16	1850	10	11
4	6	18	1900	11	12
5	2	20	1950	12	13
6	3	22	1700	13	14
7	4	24	1750	14	15
8	5	26	1800	7	8
9	6	10	1850	8	9
10	2	12	1900	9	10
11	3	14	1950	10	11
12	4	16	1700	11	12
13	5	18	1750	12	13
14	6	20	1800	13	14
15	2	22	1850	14	15
16	3	24	1900	7	8
17	4	26	1950	8	9
18	5	10	1700	9	10
19	6	12	1750	10	11
20	2	14	1800	11	12
21	3	16	1850	12	13
22	4	18	1900	13	14
23	5	20	1950	14	15
24	6	22	1700	7	8
25	2	24	1750	8	9
26	3	26	1800	9	10
27	4	10	1850	10	11
28	5	12	1900	11	12
29	6	14	1950	12	13
30	2	16	1700	13	14

6. Таблиця результатів для звіту

Заповніть за власним варіантом; укажіть одиниці, формулу і перевірку. Для зміненого сценарію Б запишіть окремий підсумок.

Контрольна величина	Мій результат	Одиниця / перевірка
ефективна площа, м²	_____	_____
суха плівка, кг	_____	_____
товарна гідроізоляція, кг	_____	_____

Контрольна величина	Мій результат	Одиниця / перевірка
грунтовка, кг	_____	_____
об'єм тріщин, м ³	_____	_____
ремонтна суміш, кг	_____	_____
полімерний компонент, кг	_____	_____
корисна площа рулону, м ²	_____	_____
кількість рулонів, шт.	_____	_____

7. Типові помилки та правила перевірки

Не змішувати геометричну товщину сухої плівки з товщиною нанесеної вологої композиції.

Не підміняти масову частку сухого залишку об'ємною, якщо відомості про густини не наведені.

Не рахувати одні й ті самі нахлисти двічі при використанні ефективної площі.

Не робити висновку щодо ремонтпридатності активної тріщини за одним її геометричним об'ємом.

8. Контрольні питання і висновок

- Чим відрізняються масовий і об'ємний сухий залишок покривного матеріалу?
- Чому вибір герметизації рухомої тріщини залежить від її роботи під навантаженням?
- Які механізми захисту від вологи притаманні покривній і рулонній гідроізоляції?
- Чому розрахункова витрата матеріалу не дає сама по собі прогноз довговічності ремонту?

Шаблон висновку: «Для варіанта № __ визначено ..., порівняно ..., перевірено У межах прийнятої моделі результат означає Для реального вибору матеріалу/рішення додатково потрібні ...».

Опорні джерела: [7, розд. 13–14, с. 284–341; 9, гл. 3–6, с. 82–220; 8, розд. 11]

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Назарко І. С., Вічко О. І. Загальна хімія: навчальний посібник для студентів технічних спеціальностей. Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя, 2019. 192 с.
2. Хоботова Е. Б. Загальна та неорганічна хімія. Частина 1. Загальна хімія: підручник. Харків: ХНАДУ, 2023. 216 с.
3. Власенко Н. Є., Коваленко І. В., Потаскалов В. А. Хімія. Частина 1. Загальна хімія: навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. 191 с.

4. Булавін В. І., Ярошок Т. П., Ведь М. В. та ін. Практикум з основ загальної хімії для організації лабораторних, семінарських занять і самостійної роботи. 3-тє вид., доповн. і випр. Харків: НТУ «ХПІ», 2017. 152 с.
5. Петрушина Г. О., Пугач Л. І., Завріна С. В. Загальна та неорганічна хімія: навчальний посібник. Дніпропетровськ: Пороги, 2016. 328 с.
6. 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.
7. Новомлинець О. О., Корзаченко М. М., Сергєєв А. І. Будівельне матеріалознавство: навчальний посібник. Чернігів: НУ «Чернігівська політехніка», 2021. 420 с.
8. Білоусова Н. А., Погребова І. С., Лінючев О. Г. Корозія та захист від корозії: навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 180 с.
9. Пшінько О. М., Савицький М. В., Зінкевич А. М. Відновлення експлуатаційної придатності бетонних, залізобетонних та кам'яних конструкцій: навчальний посібник. Дніпро: ДНУЗТ, 2018. 220 с.
10. Хоботова Е. Б. Загальна та неорганічна хімія. Частина 2. Неорганічна хімія: підручник. Харків: ХНАДУ, 2026. 300 с.

Тексти, формули та індивідуальні числові набори практичних робіт 4–9 укладено для навчальних цілей за тематикою зазначених джерел. Перші три практичні роботи відтворено з наданого методичного посібника G9 із уточненням прикладів застосування до будівництва; вони не є копією промислових технологічних регламентів. Усі наведені коефіцієнти сценаріїв і дані 30 варіантів — умовні навчальні величини.