Міністерство освіти і науки України

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНІЙ УНІВЕРСИТЕТ

Е.Б. ХОБОТОВА

ЗБІРНИК ЗАВДАНЬ З ДИСЦИПЛІНИ «РЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ТА БЕЗПЕКА МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ МІНЕРАЛЬНИХ В'ЯЖУЧИХ»

Навчальний посібник

Харків
ХНАДУ
2026

УДК 54
ББК 24.1
Х 68

Рецензенти:
Г. М. Шабанова, д-р техн. наук, проф., професор кафедри технології кераміки, вогнетривів, скла та емалей Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»;
Ю.М. Данченко, д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри фундаментальних дисциплін Національної академії національної гвардії України;
В. О. Юрченко, д-р техн. наук, проф., проф. кафедри інженерної екології міст Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова;
Н. В. Внукова, д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри екології Харківського національного автомобільно-дорожнього університету.

Рекомендовано Вченою Радою Харківського національного автомобільно-дорожнього університету (дозвіл № 81/25/4.18 від 18 грудня 2025 р.)

Е. Б. Хоботова

Збірник завдань з дисципліни «Ресурсозбереження при виробництві та безпека матеріалів на основі мінеральних в'яжучих»: Навчальний посібник / Е.Б. Хоботова. – Харків: ХНАДУ, 2027. – 111 с.

Наведено теоретичний матеріал, приклади розв'язання типових практичних завдань різного рівня складності, завдання для самоконтролю різного рівня складності для практичної підготовки студентів з дисципліни «Ресурсозбереження при виробництві та безпека матеріалів на основі мінеральних в'яжучих» за розділами. Призначено для бакалаврів, які навчаються за спеціальністю 161 «Хімічні технології та інженерія».

УДК 504.062:691.54
ББК 28.081. 2 я 7
© Хоботова Е. Б.
© Харківський національний автомобільно-дорожній університет

ВСТУП

Інженер-хімік повинен мати глибокі знання в області ресурсозбереження, які необхідні для застосування засобів хімічної технології на виробництві. Збірник завдань (навчальний посібник) створено для підвищення рівня та ефективності придбання навичок та вмінь бакалаврів, які навчаються за специальністю 161 «Хімічні технології та інженерія», з дисципліни «Ресурсозбереження при виробництві та безпека матеріалів на основі мінеральних в'яжучих».

Мета навчального посібника – допомогти студентам засвоїти практичний матеріал, навчитися розв'язувати завдання різного рівня складності з ресурсозбереження при виробництві мінеральних в'яжучих речовин.

У методичних вкзівках представлено практичні розділи дисципліни, а саме: «Пилове забруднення», «Основні фізико-механічні властивості будівельних матеріалів», «Гіпсові і вапняні в'яжучі речовини», «Ситовий аналіз», «Седиментаційний аналіз», «Оцінка промислових відходів як сировини для виробництва в'яжучих речовин», «Сучасні в'яжучі речовини на основі портландцементу».

Формат подання матеріалу включає теоретичну частину, практичну частину і завдання для самоконтролю. Для діагностування знань та рівня практичних навичок запропоновано виконати завдання самостійно, що надасть студентам можливість мати уяву про ступінь оволодіння ними певного об'єму навчального матеріалу.

Навчальний посібник складено відповідно до Силабусу з дисципліни ««Ресурсозбереження при виробництві та безпека матеріалів на основі мінеральних в'яжучих».

При підготовці збірнику завдань використано багато робіт, частина з них наведена у переліку літератури. Навчальний посібник ґрунтується на науково-методичних розробках кафедри, які створені при впровадженні кредитно-трансферної системи навчання.

1. ПИЛОВЕ ЗАБРУДНЕННЯ ТА ЙОГО ВПЛИВ НА ЗДОРОВ'Я ЛЮДИНИ

Теоретична частина

1.1. Оцінка шкідливості пилу

Багато технологічних процесів, у тому числі й у будівництві й промисловості будівельних матеріалів, супроводжуються виділенням пилу. Збільшення пилового забруднення повітря обумовлене невідповідністю між розвитком промислового виробництва й техніки очищення, зокрема процесів обезпилювання повітря. Очищення технологічних викидів – це частина основного виробництва, що повинна проектуватися одночасно з ним.

Ступінь впливу пилу на шкіру, дихальні органи й очі залежить від фізико-хімічних властивостей пилу, його токсичності, дисперсності й концентрації.

Класифікації пилу.

За способом утворення розрізняють тверді аерозолі дезінтеграції й конденсації. Аерозолі дезінтеграції утворюються при дробленні твердих речовин. Чим твердіше подрібнювана речовина, тим менше розміри часток, що утворюються. Аерозолі конденсації утворюються з парів металів, неметалів й їхніх сполук, які при охолодженні перетворюються у тверді частки.

За хімічним складом пил розділяється на органічний, неорганічний й змішаний. До органічного пилу належить пил тваринного й рослинного походження: деревний, бавовняний й ін. До неорганічного належить пил мінеральний: кварцовий, керамічний, цементний, карборундовий й металевий (рис. 1.1).

Гігієнічна класифікація пилу. З гігієнічної точки зору аерозолі підрозділяються на токсичні, фіброгенні й інертні (рис. 1.2). *Фіброгенний пил* розділяється на дві основні групи: мінеральний й органічний. Кожна із цих груп ділиться на пил кварцевмісний, «інертний» та волокнистий.

До кварцевмісного належать пили, у складі яких є 2% і більше вільного діоксиду кремнію SiO_2.

Рис. 1.1. Класифікація пилу за хімічним складом

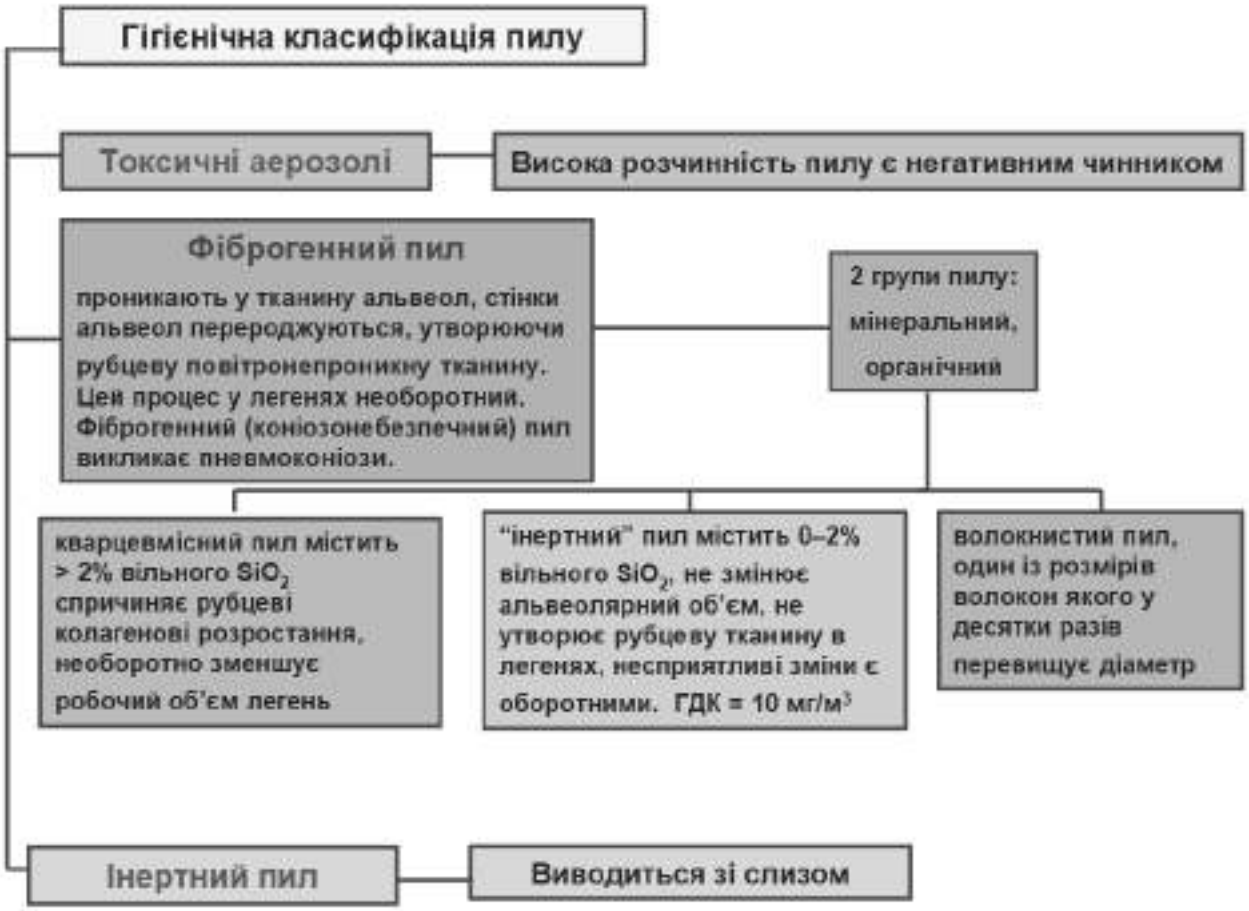


Рис. 1.2. Гігієнічна класифікація пилу

Пили з меншим вмістом SiO_2 або з повною його відсутністю є «інертними», тобто не володіють токсичними й фіброгенними властивостями. Вплив інертних аерозолів на легені не проходить безслідно, однак при цьому не змінюється об'єм легенів, не рубцюється тканина легенів, тобто несприятливі зміни є зворотними. ГДК інертних аерозолів становить 10 мг/м^3.

Розчинність аерозолів у воді й тканинних рідинах має значення. Якщо пил нетоксичний і його дія на тканину легенів зводиться до механічного роздратування, то висока розчинність таких аерозолів є позитивним чинником, що сприяє його видаленню з легенів. У випадку токсичних речовин висока розчинність пилу є негативним чинником.

До волокнистого відносяться пили мінерального й органічного походження, один з розмірів яких, наприклад довжина, у десятки разів перевищує діаметр. До такого пилу належить азбест, бавовняний пил, пил полімерів (лавсану, нітрону, капрону). Біологічна дія пилу полімерів обумовлена вмістом у них залишкових мономерів (для капрону – капролактаму, для нітрону – акрилонітрилу й т. д.).

За ступенем дисперсності атмосферні забруднення поділяють на аеродисперсії та гази (рис. 1.3). Аеродисперсії – це системи, у яких роздроблена тверда або рідка речовина (фаза) розподілена в газовому (повітряному) середовищі.

За ступенем дисперсності пил розділяється на три групи: видимий – з розміром часток 10 мкм; мікроскопічний – від 10 до 0,25 мкм й ультрамікроскопічний – менш 0,25 мкм, видимий тільки через електронний мікроскоп.

Часто пилом називають не тільки середовище зі зваженими частками, але й самі пилові частки різного походження, у тому числі й осілі (порошки). Через розвинуту поверхню багато пилів володіють підвищеною вибухо- і вогненебезпечністю.

Порівняти дисперсність різних пилів можна, зіставляючи інтегральні криві розподілу маси їхньої дисперсної фази (N, %) за розмірами частинок. Така класифікаційна номограма (рис. 1.4) являє собою ймовірносно-логарифмічну сітку, на яку нанесені границі п'яти класифікаційних груп пилів: I – дуже

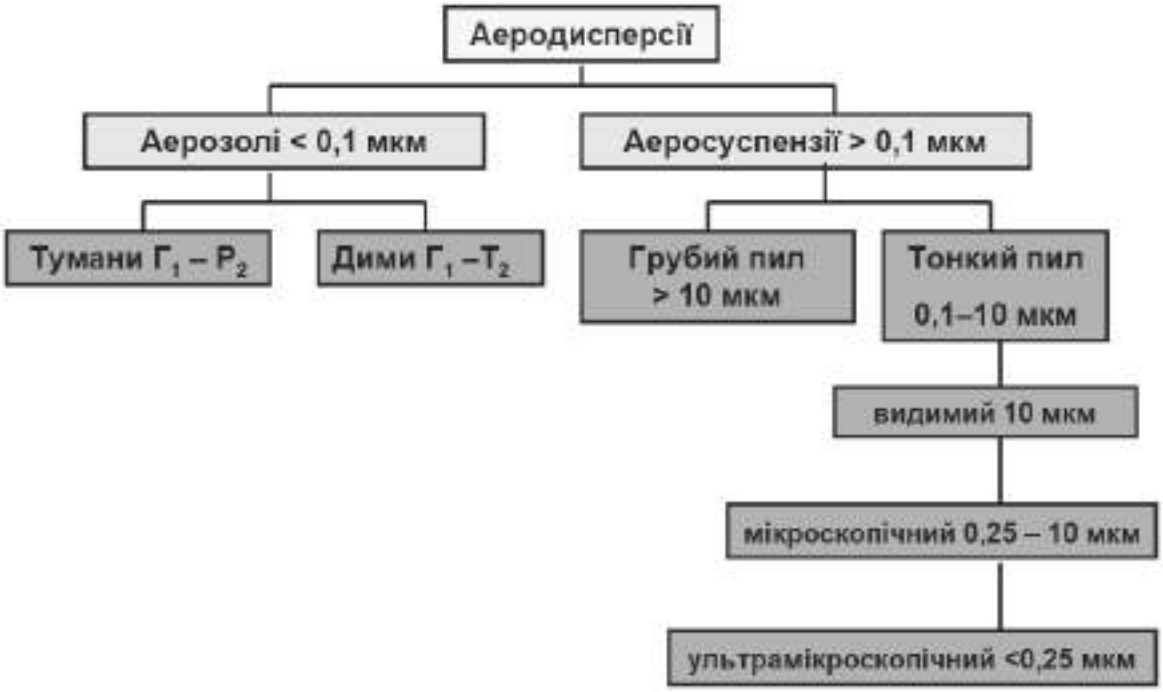


Рис. 1.3. Класифікація пилу за ступенем дисперсності

крупнодисперсний пил; II – крупнодисперсний пил (дрібнозернистий пісок для будівельних розчинів); III – дрібнозернистий пил (мелений кварц, цемент); IV – середньодисперсний пил (дим мартенівських печей); V – високодисперсний пил (атмосферний пил). Розташування кривої в тій або іншій зоні номограми означає приналежність даного пилу до відповідної класифікаційної групи.

1.2. ГДК пилу та його допустимий вміст

Шкідливість впливу пилу на організм людини залежить від запиленості повітря, тобто концентрації пилу. Санітарними нормами регламентовані ГДК пилу й аерозолів у повітрі робочої зони.

Визначення концентрації пилу. Концентрацію пилу можна визначити ваговим і розрахунковим методами. *Ваговий метод* заснований на принципі одержання приросту ваги фільтра при пропуску через нього певного об’єму досліджуваного повітря.

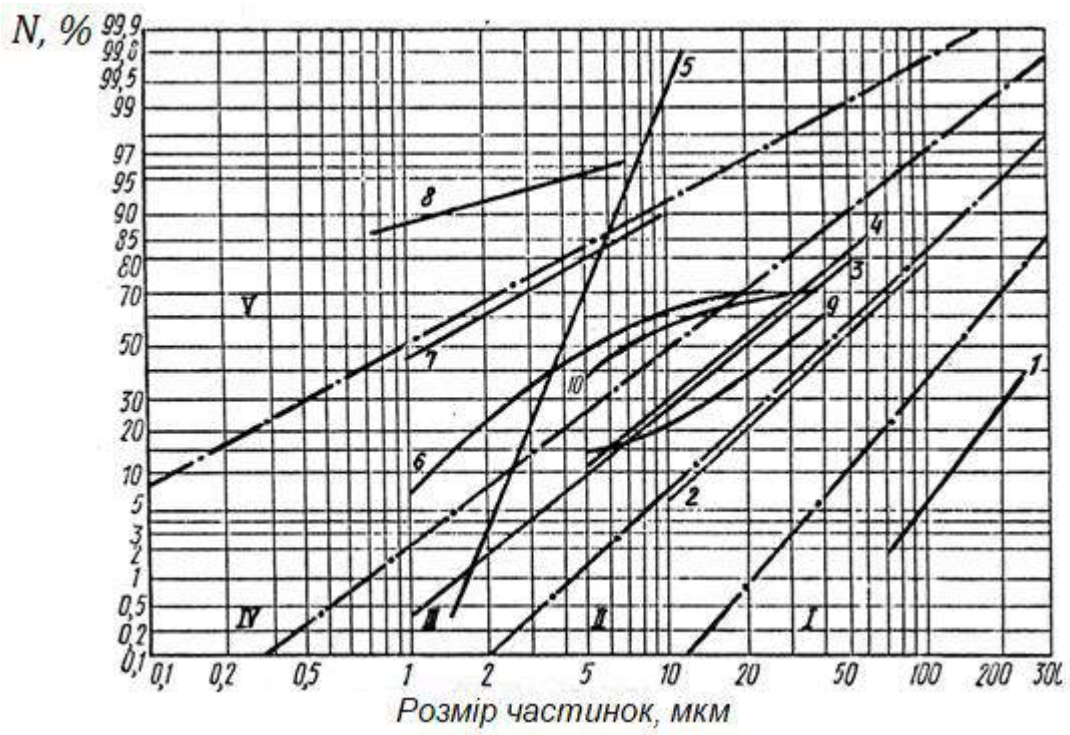


Рис. 1.4. Класифікаційна номограма пилів по їхній дисперсності: I–V – класифікаційні групи пилів по їхній дисперсності: 1 – вугілля, подрібнене у кульовому млині; 2 – дрібнозернистий кварцовий пісок; 3 – пилоподібний кварц; 4 – цемент; 5, 6 – пилі, застосовувані при випробуваннях лабораторією ЦНДІПромбуд; 7 – дим мартенівських печей; 8 – атмосферний пил; 9, 10 – стандартний пил

Розрахунковий метод застосовують при відносно малій запиленості. По цьому методі визначають кількість пилових частинок в одиниці об’єму повітря. Для цього використають спеціальні прилади – коніметри, що складаються з зволожувальної трубки, поршневого насоса, прийомної камери й предметного скла.

Допустимий вміст пилу у викидах $C_В$ (мг/м^3) визначають розрахунковим методом для різних об’ємних витрат повітря:

1) при об’ємній витраті повітря більше 15000 м^3/год

$$C_В = 100 \cdot K_2; \qquad (1.1)$$

2) при об’ємній витраті повітря 15000 м^3/год і менш

$$C_В = (160 - 4Q_V)K_2, \qquad (1.2)$$

де Q_v – об’ємна витрата повітря, тис. м^3/год; K_2 – коефіцієнт, який приймається залежно від ГДК пилу в повітрі робочої зони:

ГДК, мг/м^3	< 2	2–4	4–6	< 6
K_2	0,3	0,6	0,8	1,0.

1.3. Аерозолі фіброгенної дії

Фізіологічний механізм пилового впливу SiO_2. При проходженні запиленого повітря по дихальних шляхах за час вдиху й видиху він звільняється від зважених частинок у результаті інерційного пиловідокремлення. Сумарне відкладення аерозолю в органах дихання перевищує 90% за масою. За тривалий період роботи в запиленій атмосфері в легенях затримується близько 2% первинно відкладеної маси, що може становити грами й навіть десятки грамів.

Встановлено дві основні форми профзахворювань, пов'язаних із вдиханням пилу: пневмоконіоз і пиловий бронхіт. *Пневмоконіоз* – група незворотних та невиліковних професійних захворювань легень, викликаних тривалим вдиханням виробничого пилу і розвитком у них фіброзного процесу. *Фіброз* – розростання сполучної тканини з появою рубцевих змін у різних органах, що виникає, як правило, внаслідок хронічного запалення. Фіброзне заміщення тканин призводить до поступової втрати їх специфічних функцій та дисфункції ураженого органу (наприклад, легенева недостатність при фіброзі легень).

До аерозолів фіброгенної дії належать силіцій(IV) оксид SiO_2, силікати, азбести, тальк, слюда. Всі зазначені речовини при гідролізі утворять силікатну кислоту, що є протоплазматичною отрутою й викликає некроз клітин, потім проліферацію сполучної тканини (фіброз) – дрібне рубцювання легеневої тканини. Прогресування пневмоконіозів відбувається повільно й непомітно. Щорічно від пневмоконіозів вмирає 1000 чоловік і ще більше стають інвалідами.

Розрізняють *п'ять груп пневмоконіозів:*

I. Викликувані мінеральним пилом:

а) силікоз;

б) силікатози (азбестоз, талькоз, каоліноз, цементоз й ін.).

II. Викликувані металевим пилом:

а) охроз;
б) алюміноз;
в) бериліоз;
г) барітоз;
д) манганоконіоз й ін.
III. Викликувані вуглеродовмісним пилом:
а) антракоз;
б) графітоз й інших.
IV. Викликувані органічним пилом:
а) біссіноз (від пилу бавовни й льону);
б) багассоз (від пилу цукрового тростнику);
в) фермерська легеня (від сільськогосподарського пилу, що містить гриби).
V. Викликувані пилом змішаного складу:
а) силіко-азбестоз;
б) силіко-антракоз й інші.

В основу класифікації пневмоконіозів покладений етіологічний принцип, тобто характер пилу, виробничий контакт із яким може приводити до розвитку даного професійного захворювання.

Найбільш агресивна фіброгенна речовина – вільний SiO_2. Силіцій(IV) оксид є мінеральним полімером $(SiO_2)_x$. Для SiO_2 існують кристалічні модифікації: кварц, тридиміт і кристобаліт, і аморфні модифікації (рис. 1.5). Аморфні модифікації підрозділяються на 2 групи залежно від механізму конденсації: з газової й рідкої фази.

Рис. 1.5. Класифікація форм силіцій (IV) оксиду

ГДК пилу кристалічного SiO_2 дорівнює 1 мг/м^3. Залежно від вмісту в пилу вільного SiO_2 виділяються кілька градацій ГДК (таблиця 1.1).

Таблиця 1.1

Градації ГДК залежно від відсоткового вмісту в пилу SiO_2

ГДК, мг/м^3	Вміст вільного SiO_2, %
1	> 70
2	70–10
3	< 10

Наприклад, пили, що містять 65% й 15% вільного SiO_2 і викликають різко різні фіброзні зміни в легенях, мають ту саму ГДК рівну 2 мг/м^3.

В біологічному відношенні аерозолі конденсації SiO_2 з газового середовища характеризуються значно більшою активністю, їх ГДК дорівнює 1 мг/м^3.

Розчинність пилу оцінюють як властивість, що прискорює виведення пилу з легенів. Тому кремнеземовмісний пил, за інших рівних умов, тим фіброгенніший, чим менш розчинний.

Пил кристалічних модифікацій SiO_2 більш фіброгенний, чим аморфні різновиди. Однак, кристалічна модифікація SiO_2 стешовіт не викликає розвиток фіброзу.

Кварцовий пил являє собою досить важко розчинну сполуку. Особливості розчинності кварцового й інших кремнеземних, а також силікатних пилів полягає у тому, що не всі шари пилових частинок мають однакову розчинність – легко розчиняється тільки поверхневий шар пилової частинки, а глибокий шар, у силу утворення захисної колоїдної плівки силікатної кислоти, розчиняється вкрай повільно, що відіграє велику роль у розвитку фіброзу тканин. У тканинних рідинах, наприклад, у сироватці крові кварцовий пил протягом тижня розчиняється тільки на 0,007%.

У розвитку силікозу велике значення має концентрація SiO_2й розміри пилових частинок. Для виникнення, розвитку й важкості процесу найбільше значення мають ті види виробничого пилу, які мають розмір частинок 1–2 мкм і містять вільний SiO_2 в кількості більше 5–10%.

Практична частина

1.4. Визначення класифікаційної групи з дисперсності пилу

1. Визначте належність промислового пилу до певної класифікаційної групи з дисперсності частинок, якщо для неї характерний наступний розподіл частинок за розміром (таблиця 2).

Таблиця 1.2

Розподіл частинок пилу за розміром

Розмір частинок, км	0,15	0,7	3,0	15,0
Масовий вміст частинок, %	3,0	20,0	20,0	57,0

Розв'язання: Для визначення групи пилу за ступенем дисперсності використовуємо класифікаційну номограму пилів (рис. 1.4). Нанесені на номограму експериментальні точки (обведені кружальцями) потрапляють до IV групи (рис. 1.6).

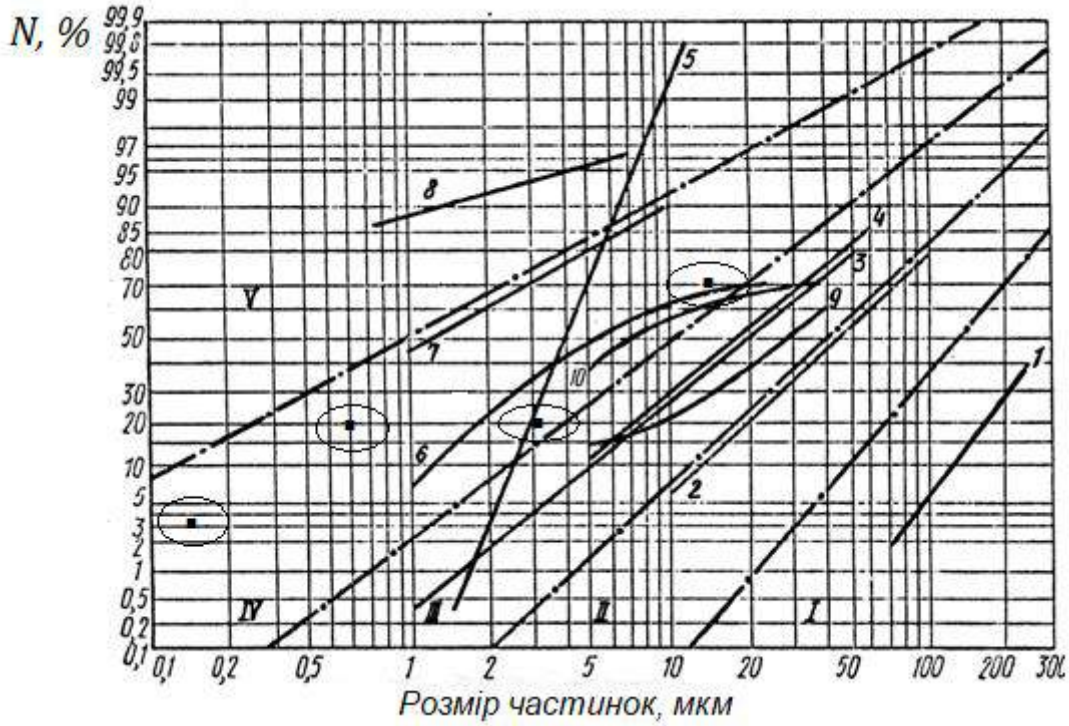


Рис. 1.6. Класифікаційна номограма пилів за дисперсністю з нанесеними експериментальними значеннями, що відповідають таблиці 1.2

1.5. Розрахунки ГДК пилу та його допустимого вмісту

2. Визначте допустимий вміст пилу у викидах підприємства, якщо виробничий пил містить 40% вільного SiO_2, а об'ємні витрита повітря складають 4000 м^3/год.

Дано:

$N_{\text{вільного } SiO_2} = 40\ \%$

Q_v = 4000 м^3/год

Розв'язання: Відповідно до таблиці 1.1 при вмісті в пилу 40% вільного SiO_2 ГДК пилу приймається рівною 2 мг/м^3. Допустимий вміст пилу у викидах при об'ємній витраті повітря 15000 м^3/год і менш розраховується за формулою (1.2):

$$C_{\text{В}} = (160 - 4Q_V)K_2 = (160 - 4 \cdot 4) \cdot 0{,}6 = 86{,}4 \text{ мг/м}^3,$$

де K_2 – коефіцієнт, який приймається залежно від ГДК пилу в повітрі робочої зони, при ГДК = 2–4 мг/м^3 дорівнює 0,6.

Відповідь: Допустимий вміст пилу у викидах складає 86,4 мг/м^3.

3. Визначте допустимий вміст пилу у викидах підприємства, якщо виробничий пил містить 75% вільного SiO_2, а об'ємні витрита повітря складають 17500 м^3/год.

Дано:

$N_{\text{вільного } SiO_2} = 75\ \%$

Q_v = 17500 м^3/год

Розв'язання: Відповідно до таблиці 1.1 при вмісті в пилу 75% вільного SiO_2 ГДК пилу приймається рівною 1 мг/м^3. Допустимий вміст пилу у викидах при об'ємній витраті повітря більше 15000 м^3/год розраховується за фоормулою (1.1):

$$C_{\text{В}} = 100 \cdot K_2 = 100 \cdot 0{,}3 = 30 \text{ мг/м}^3,$$

де K_2 – коефіцієнт, який приймається залежно від ГДК пилу в повітрі робочої зони, при ГДК = < 2 мг/м^3 дорівнює 0,3.

Відповідь: Допустимий вміст пилу у викидах складає 30 мг/м^3.

Завдання для самоконтролю

1. Які основні джерела утворення пилу та його класифікації Вам знайомі?
2. Як визначити допустимий вміст пилу?
3. Надайте характеристику властивостям пилових частинок.
4. От яких чинників залежить утримання пилових частинок у дихальних шляхах? Опишіть механізм дії фіброгенних аерозолів.
5. Чім відрізняються три форми пневмоконіозів?
6. Опишіть заходи профілактики пилових захворювань.
7. Визначте належність промислового пилу до певної класифікаційної групи з дисперсності частинок, якщо для неї характерний наступний розподіл частинок за розміром

Розподіл частинок пилу за розміром

Розмір частинок, км	0,25	0,6	2,0	17,0
Масовий вміст частинок, %	4,0	10,0	30,0	56,0

8. Визначте допустимий вміст пилу у викидах підприємства, якщо виробничий пил містить 28% вільного SiO_2, а об’ємні витрати повітря складають 4000 м^3/год.
9. Визначте допустимий вміст пилу у викидах підприємства, якщо виробничий пил містить 73% вільного SiO_2, а об’ємні витрати повітря складають 16700 м^3/год.

2. ОСНОВНІ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

Теоретична частина

2.1. Види щільності будівельних матеріалів

Знання про загальні властивості будівельних матеріалів дає можливість раціонально використовувати їх у будівництві та при інженерно-технічних розрахунках. Так, наприклад, за значеннями середньої та істинної щільностей будівельних матеріалів, можна розрахувати яку пористість мають ці матеріали, що, у свою чергу, дозволяє скласти досить повне уявлення про міцність, теплопровідність, водопоглинання та інші важливі властивості матеріалів і на цій підставі вирішувати питання про їх застосування в тих чи інших конструкціях та спорудах.

Величина середньої щільності будівельних матеріалів необхідна для розрахунку навантажень, визначення ваги споруд, транспортних розрахунків, вибору ємності складських приміщень.

Щільність (густина) – це маса одиниці об’єму матеріалу

$$\rho = \frac{m}{V}, \text{ г/см}^3 \text{ або кг/м}^3. \qquad (2.1)$$

Істинна щільність – це маса об’єму матеріалу в абсолютно щільному стані (без пор, пустот і тріщин)

$$\rho_{\text{і}} = \frac{m}{V_a}, \text{ г/см}^3 \text{ або кг/м}^3, \qquad (2.2)$$

де $\rho_{\text{і}}$ – істинна щільність;

m – маса матеріалу в абсолютно ущільненому стані;

$V_{\text{а}}$ – об’єм матеріалу в абсолютно ущільненому стані

$$V_{\text{а}} = V - V_{\text{п}}, \qquad (2.3)$$

де V – об’єм матеріалу в природному стані;

$V_{\text{п}}$ – об’єм пор в матеріалі.

Абсолютний об'єм матеріалу V_a визначають за об’ємом витісненої інертної рідини (води, гасу, спирту) після засипки в спеціальний об'ємомір (мірний циліндр, пікнометр, прилад Ле Шательє), попередньо висушеного і доведеного до тонкопорошкоподібного стану матеріалу.

Визначення істинної щільності матеріалу за допомогою мірного циліндра. Підготовлену наважку матеріалу засипають у циліндр з інертною рідиною (рис. 2.1).

Рис. 2.1. Мірний циліндр

Об'єм рідини фіксують двічі: спочатку без порошку, потім із порошком.

Істинну щільність матеріалу обчислюють за формулою

$$\rho = \frac{m}{V_2 - V_1}, \text{ г/см}^3, \tag{2.4}$$

де m – маса порошку;

V_1 – об’єм рідини;

V_2 – об’єм рідини і порошку.

Визначення істинної щільності матеріалу з використанням приладу Ле Шательє. У прилад (рис. 2.2) до нульової позначки заливають інертну рідину. Зважують 50 г порошку і засипають частково або повністю, щоб рівень рідини опинився у верхній

градуйованої частини, після чого фіксують об'єм рідини, витіснений порошком. Якщо частина порошку залишилася, її зважують.

Рис. 2.2. Прилад Ле Шательє

Істинну щільність матеріалу обчислюють за формулою

$$\rho = \frac{m - m_1}{V}, \text{ г/см}^3, \qquad (2.5)$$

де m – наважка матеріалу до досліду;

m_1 – залишок від наважки;

V – об'єм рідини, витісненої наважкою матеріалу.

Середня щільність – це маса одиниці об’єму матеріалу у природному стані (разом с порами, пустотами і тріщинами)

$$\rho_{сер} = \frac{m_0}{V} = \frac{m_0}{V_т - V_{пор}}, \text{ г/см}^3, \qquad (2.6)$$

де $\rho_{сер}$ – середня щільність;

m_0 – маса матеріалу у природному стані:

V – об’єм матеріалу у природному стані, що містить частинки твердої фази $V_т$ і об’єм пор, пустот і тріщин $V_{пор}$.

Середню щільність матеріалів визначають на цілих виробах або зразках правильної та неправильної форми у стані природної вологості, а також у сухому та водонасиченому станах.

Визначення середньої щільності зразків правильної геометричні форми. Форма зразків: куб, циліндр, прямокутна призма. Зразки обмірюють, обчислюють об'єм V. На терезах встановлюють масу m. Середню щільність матеріалу обчислюють за формулою

$$\rho_{сер} = \frac{m}{V}, \text{ г/см}^3 \text{ або кг/м}^3. \qquad (2.7)$$

Визначення середньої щільності зразків неправильної форми з використанням мірного циліндра. У циліндр на ⅓–½ висоти шкали наливають воду, фіксують її об'єм V_1. Висушений зразок неправильної форми зважують. Покривають парафіном та знову зважують. Парафінований зразок поміщають в циліндр і визначають його об'єм з водою. Середню щільність зразка розраховують за формулою

$$\rho_{сер} = \frac{m}{V_2 - V_1 - \dfrac{m_1 - m}{\rho_{пар}}}, \text{ г/см}^3, \qquad (2.8)$$

де m – маса висушеного зразка матеріалу;

m_1 – маса зразка, покритого парафіном;

V_1 – вихідний об’єм води в циліндрі;

V_2 – об’єм води і парафінованого зразка;

$\rho_{пар}$ – щільність парафіну.

Визначення середньої щільності зразків неправильної форми методом гідростатичного зважування. Парафінований зразок зважують спочатку на повітрі, потім – на гідростатичних вагах (рис. 2.3). Середню щільність визначають за формулою

$$\rho_{сер} = \frac{m}{\frac{m_1 - m_2}{\rho_{води}} - \frac{m_1 - m}{\rho_{пар}}}, \text{ г/см}^3, \qquad (2.9)$$

де m – маса зразка матеріалу;

m_1 – маса парафінованого зразка на повітрі;

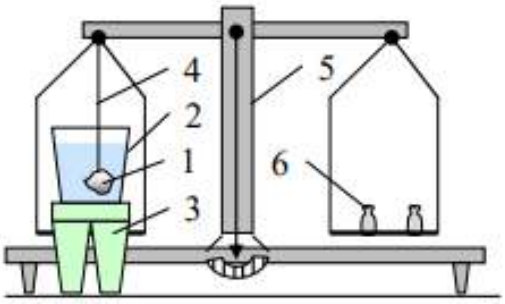


Рис. 2.3. Гідростатичне зважування:
1– парафінований зразок; 2– склянка з водою; 3 – полиця;
4 – тонкий дріт; 5– ваги технічні; 6 – гирі

m_2 – маса парафінованого зразка у воді;

m_1–m_2 – втрата маси у воді, що дорівнює масі витісненої води.

Насипна щільність – це маса одиниці об'єму матеріалу в пухкому насипному стані. Насипну щільність матеріалу визначають за відношенням маси зернистого матеріалу до всього займаного ним об’єму, включаючи пори і міжзернові порожнечі, що є в ньому

$$\rho_н = \frac{m}{V_{мат}} = \frac{m}{V_т + V_{пор} + V_{порож}}, \text{ г/см}^3, \qquad (2.10)$$

де m – маса одиниці об'єму матеріалу;

$V_т$ – об’єм твердої фази матеріалу;

$V_{пор}$ – об’єм пор;

$V_{порож}$ – об’єм порожнеч.

Сутність методу полягає у заповненні мірної судини пухко зернистим матеріалом. Залежно від крупності частинок матеріалу використовують судини різної місткості. Якщо розмір частинок матеріалу становить 0−5 мм, то об'єм судини має бути

1−2 л, якщо розмір частинок 5−40 мм, то об'єм судини – 10 л, і якщо розмір частинок більше 40 мм, то об'єм судини − 20 л.

Насипну щільність сипучих матеріалів (пісок, цемент та ін.) визначають за допомогою лійки у вигляді конуса із заслінкою в нижній частині (рис. 2.4). Під лійку ставлять заздалегідь зважений мірний посуд ємністю 1 л. У лійку засипають сухий матеріал, відкривають заслінку і з висоти 10 см заповнюють судину з

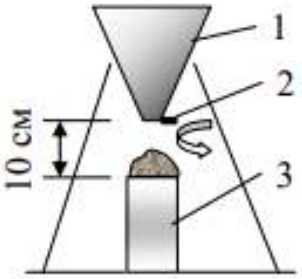


Рис. 2.4. Визначення насипної щільності: 1– лійка-конус; 2 – заслінка;
3 – мірна судина

надлишком. Металевою лінійкою зрізують надлишок матеріалу врівень з краями судини (без ущільнення) і зважують.

Насипну щільність матеріалу обчислюють за формулою

$$\rho_{н} = \frac{m_2 - m_1}{V}, \text{ г/см}^3, \qquad (2.11)$$

де m_1 – маса мірної судини;
m_2 – маса судини з матеріалом;
V − об’єм судини.

2.2. Пористість і пустотність будівельних матеріалів

Пористість – це частка заповнення матеріалу порами

$$П = \frac{V_{пор}}{V_{мат}} \cdot 100\% = \left[1 - \frac{\rho_{сер}}{\rho}\right] \cdot 100\%, \qquad (2.12)$$

де П – загальна пористість матеріалу, %;

ρ – істинна щільність матеріалу;

$\rho_{сер}$ – середня щільність матеріалу.

Пористість у матеріалі характеризується як відкритими, і закритими порами. Відкриту пористість можна визначити за величиною водопоглинання за об'ємом

$$П_{відкр} = В_V, \quad (2.13)$$

де $П_{відкр}$ − відкрита пористість, %;

$В_V$ − водопоглинання за об'ємом.

Закриту пористість $П_{закр}$ визначають за різницею

$$П_{закр} = П - П_{відкр}. \quad (2.14)$$

Пористість будівельних матеріалів коливається в широких межах:

у скла та металу вона становить 0%,

граніту та мармуру − 0,2−0,8%,

керамічної цегли − 18−35%,

важкого бетону − 5−10%,

газобетону − 55−85%,

комірчастих пластмас 90−9 5%.

Від величини пористості та її характеру залежать найважливіші властивості матеріалу: щільність, міцність, теплопровідність, довговічність та ін. Відкриті пори збільшують водопоглинання та водопроникність матеріалу та погіршують його морозостійкість. Однак у звукопоглинаючих матеріалах та виробах навмисне створюється відкрита пористість та перфорація, необхідні для поглинання звукової енергії.

Збільшення пористості за рахунок закритої збільшує довговічність матеріалу, знижує теплопровідність.

З підвищенням пористості матеріалу збільшується гігроскопічність та водопоглинання. А водопоглинання негативно впливає на основні властивості матеріалу, збільшується щільність, матеріал набухає, його теплопровідність зростає, а міцність і морозостійкість знижуються. Високопористі матеріали (деревина, пористі бетони), здатні поглинати багато води, характеризуються великою усадкою.

Міжзернова пустотність $V_п$ для зернистих та порошкоподібних матеріалів розраховується за формулою

$$V_П = 1 - \frac{\rho_н}{\rho_{сер}} \cdot 100\%, \qquad (2.15)$$

де $\rho_н$ – насипна щільність матеріалу;
$\rho_{сер}$ – середня щільність матеріалу.

2.3. Водопоглинання будівельних матеріалів

Водопоглинання – це здатність матеріалу вбирати і утримувати в порах воду. Водопоглинання характеризує максимальну міру зволоження матеріалу, тобто такий стан, при якому всі відкриті пори заповнені водою. Розрізняють водопоглинання за масою та об’ємом:

водопоглинання за масою $$В_m = \frac{m_{води}}{m_{мат}} \cdot 100\%, \qquad (2.16)$$

де $m_{води}$ – маса води, що поглинута матеріалом, г;
$m_{мат}$ – маса матеріалу, г;

водопоглинання за об’ємом $$В_V = \frac{V_{води}}{V_{мат}} \cdot 100\%, \qquad (2.17)$$

де $V_{води}$ – об’єм води, що поглинута матеріалом, см^3;
$V_{мат}$ – об’єм матеріалу, см^3.

Водопоглинання визначають не менш як на трьох зразках матеріалу. Зразки попередньо висушують у сушильній шафі за температури 105 °С до постійної маси, охолоджують до кімнатної температури, зважують, обмірюють та обчислюють об'єм. Потім укладають у ємність із водою, що має температуру 20 °С. У воді зразки витримують 48 год, потім виймають, обтирають м'якою вологою тканиною і відразу зважують.

Водопоглинання зразків за масою та об’ємом обчислюють за формулами

$$В_m = \frac{m_{нас} - m_{сух}}{m_{сух}} \cdot 100\%; \qquad (2.18)$$

$$В_V = \frac{m_{нас} - m_{сух}}{V_{мат} \cdot \rho_{води}} \cdot 100\%, \qquad (2.19)$$

де $m_{нас}$ – маса матеріалу, що насичений водою, г;

$m_{сух}$ – маса сухого матеріалу, г.

Тоді

$$В_V = В_m \cdot d = В_m \cdot \frac{\rho_{сер}}{\rho_{H_2O}}. \qquad (2.20)$$

де d – відносна щільність матеріалу.

Практична частина

1. Керамзитобетон (легкий бетон на пористих заповнювачах) має пористість 38% та істинну шільність, рівну 2600 кг/м³. Чому дорівнює середня щільність керамзитобетону?

Розв'язання: Пористість зразку розраховують за формулою $П = 1 - \frac{\rho_{сер}}{\rho}$, звідси знаходять середню щільність

$$\rho_{сер} = (1 - П) \cdot \rho = (1 - 0{,}38) \cdot 2600 = 1612 \text{ кг/м}^3.$$

Відповідь: Середня щільність керамзитобетону дорівнює 1612 кг/м³.

2. Визначити середню щільність вапняного тісту, якщо воно містить 50% води. Істинна щільність вапна складає 2,05 г/л.

Розв'язання: В 1 кг вапняного тіста міститься 500 г вапна і 500 г води. Абсолютний об'єм вапняного тісту складеться з абсолютного об'єму вапна та абсолютного об'єму води або

$$V_т = \frac{m_в}{\rho_в} + \frac{m_{H_2O}}{\rho_{H_2O}} = \frac{500}{2{,}05} + \frac{500}{1} = 744 \text{ см}^3.$$

Середня щільність вапняного тіста

$$\rho_{сер} = \frac{m}{V} = \frac{1000}{744} = 1{,}34 \text{ г/см}^3.$$

Відповідь: Середня щільність вапняного тісту дорівнює 1,34 г/см^3.

3. Який висоти колону перерізом 40х40 см можна забетонувати з 3 т звичайного важкого бетону, що має щільність 2,3 т/м^3?

Розв'язання: Розраховують об'єм колони

$$V = \frac{m}{\rho_{сер}} = \frac{3}{2{,}3} = 1{,}3 \text{ м}^3.$$

Висота колони складе

$$h = \frac{V}{ab} = \frac{1{,}3}{0{,}4 \cdot 0{,}4} = 8{,}125 \text{ м}.$$

Відповідь: Можна забетонувати колону висотою 8,125 м.

4. Розрахуйте мінімально необхідний об'єм цементної ємності для зберігання 3000 т портландцементу з насипною густиною 1,1 г/см^3.

Розв'язання: Насипна щільність $\rho_н = \frac{m}{V_{мат}}$, звідси об'єм ємності

$$V = \frac{m}{\rho_{нас}} = \frac{3000}{1{,}1} = 2727 \text{ м}^3.$$

Відповідь: Мінімально необхідний об'єм ємності складає 2727 м^3.

5. Зразок полімеррозчину з істинною щільністю 3900 кг/м^3, розміром 40х40х160 мм, має масу 870 г. Визначте значення загальної пористості цього матеріалу.

Розв'язання: Об'єм зразку полімеррозчину

$$V = a \cdot b \cdot c = 4 \cdot 4 \cdot 16 = 256 \text{ см}^3.$$

Середня щільність

$$\rho_{сер} = \frac{m}{V} = \frac{870}{256} = 3{,}4 \text{ г/см}^3.$$

Загальна пористість

$$П = (1 - \frac{\rho_{сер}}{\rho}) \cdot 100\% = \left(1 - \frac{3{,}4}{3{,}9}\right) \cdot 100\% = 13\%.$$

Відповідь: Загальна пористість полімеррозчину дорівнює 13%.

6. Визначте закриту пористість зразка зі звичайного важкого бетону із середньою щільністю 2300 кг/м^3, розміром 100х100х100 мм, якщо відомо, що значення істинної щільності цього матеріалу становить 2600 кг/м^3, а водопоглинання за об'ємом через 3 години витримки у воді − 5%, через 6 годин − 7%, через 12 годин − 7%.

Розв'язання: Об'єм зразку

$$V = a^3 = 10^3 = 1000 \text{ см}^3.$$

Максимальне водопоглинання за об'ємом складає $В_V$=7%.

Загальна пористість

$$П = (1 - \frac{\rho_{сер}}{\rho}) \cdot 100\% = \left(1 - \frac{2300}{2600}\right) \cdot 100\% = 12\%.$$

Враховують, що відкрита пористість дорівнює водопоглинанню $П_{відкр} = В_V$, тоді закрита пористість складе

$$П_{закр} = П - П_{відкр} = 12 - 7 = 5\%.$$

Відповідь: Закрита пористість зразку з важкого бетону дорівнює 5%.

7. Зовнішня стінова панель із газобетону має розміри 3,0х1,2х0,3 м та масу 1,3 т. Розрахуйте пористість газобетону, прийнявши, що його істинна щільність дорівнює 2600 кг/м^3.

Розв'язання: Об'єм панелі

$$V = a \cdot b \cdot h = 3 \cdot 1{,}2 \cdot 0{,}3 = 1{,}08 \text{ м}^3.$$

Середня щільність газобетону

$$\rho_{сер} = \frac{m}{V} = \frac{1300}{1{,}08} = 1204 \text{ кг/м}^3.$$

Пористість бетону

$$П = (1 - \frac{\rho_{сер}}{\rho}) \cdot 100\% = \left(1 - \frac{1204}{2600}\right) \cdot 100\% = 54\%.$$

Відповідь: Пористість панелі із газобетону дорівнює 54%.

8. Порівняти між собою пористість керамічної цегли та вапняку-ракушняку, якщо відомо, що справжня щільність цегли дорівнює 2600 кг/м^3, а вапняку-ракушняку – 2700 кг/м^3. При цьому середня щільність цегли на 20% менша за середню щільність ракушняку, у якого водопоглинання за об'ємом у 2 рази більше водопоглинання за масою.

Розв'язання: Виходячи із формули

$$В_V = В_m \cdot \frac{\rho_{сер}}{\rho_{H_2O}},$$

середня щільність ракушняку складе

$$\rho^{р}_{сер} = \frac{В_V \cdot \rho_{H_2O}}{В_m} = 2 \text{ г/см}^3 = 2000 \text{ кг/м}^3.$$

Середня щільність керамічної цегли

$$\rho^{ц}_{сер} = 2 - 2 \cdot 0{,}2 = 1{,}6 \text{ г/см}^3 = 1600 \text{ кг/м}^3.$$

Пористість керамічної цегли

$$П^{ц} = (1 - \frac{\rho_{сер}}{\rho}) \cdot 100 = (1 - \frac{1600}{2600}) \cdot 100 = 38{,}6\%.$$

Пористість вапняку-ракушняку

$$П^{р} = (1 - \frac{\rho_{сер}}{\rho}) \cdot 100 = (1 - \frac{2}{2,7}) \cdot 100 = 26\%.$$

$$\Delta П = П^{ц} - П^{р} = 38,6 - 26 = 12,5\%.$$

Відповідь: Пористість керамічної цегли на 12,5% більше за пористість вапняку-ракушняку.

9. Маса сухого зразка вапняку-ракушняку об'ємом 250 см^3 дорівнює 400 г. Після насичення водою його маса збільшилася до 500 грам. Знайти водопоглинання зразка за масою та об'ємом.

Розв'язання: Водопоглинання за масою

$$В_m = \frac{m_{нас} - m_{сух}}{m_{сух}} \cdot 100\% = \frac{500 - 400}{400} \cdot 100 = 25\%.$$

Водопоглинання за об'ємом

$$В_V = \frac{m_{нас} - m_{сух}}{V_{мат} \cdot \rho_{води}} \cdot 100\% = \frac{500 - 400}{250 \cdot 1} \cdot 100 = 40\%.$$

Відповідь: Водопоглинання вапняку-ракушняку за масою дорівнює 25%, за об'ємом – 40%.

10. Маса зразка вапняку у сухому стані дорівнює 0,7 кг. Визначити масу зразка після насичення його водою, якщо відомо, що водопоглинання за об'ємом дорівнює 21%, а середня щільність вапняку – 1900 кг/м^3.

Розв'язання: Визначають об'єм зразка

$$V = \frac{m}{\rho_{сер}} = \frac{700}{1,9} = 368 \text{ см}^3.$$

З формули водопоглинання за об'ємом

$$В_V = \frac{m_{нас} - m_{сух}}{V_{мат} \cdot \rho_{води}} \cdot 100\%$$

знаходимо масу вологого зразка

$$m_{нас} = B_V \cdot V \cdot \rho_{води} + m_{сух} = 0,21 \cdot 368 \cdot 1 + 700 = 777,28 \text{ г.}$$

Відповідь: Маса зразка вапняку після насичення водою дорівнює 777,28 г.

11. Маса сухого зразка ракушняку дорівнює 7 кг. Після повного водонасичення його маса стає 7,5 кг. Визначити розрахунковим шляхом водопоглинання за об'ємом та пористість ракушняку, якщо середня щільність його дорівнює 1400 кг/м^3, а істинна щільність – 2600 кг/м^3.

Розв'язання: Визначають об'єм зразка вапняку-ракушняку

$$V = \frac{m}{\rho_{\text{сер}}} = \frac{7000}{1{,}4} = 5000 \text{ см}^3.$$

Водопоглинання за об'ємом

$$\text{В}_V = \frac{m_{\text{нас}} - m_{\text{сух}}}{V_{\text{мат}} \cdot \rho_{\text{води}}} \cdot 100\% = \frac{7500 - 7000}{5000} \cdot 100 = 10\%.$$

Пористість ракушняку

$$\Pi = (1 - \frac{\rho_{\text{сер}}}{\rho}) \cdot 100\% = \left(1 - \frac{1400}{2600}\right) \cdot 100\% = 46\%.$$

Відповідь: Водопоглинанння за об'ємом ракушняку дорівнює 10%, пористість складає 46%.

12. Зразок матеріалу масою 52 г після парафінування мав масу на повітрі 55 г, а у воді 15 г. Розрахувати середню щільність матеріалу. Щільність парафіну прийняти рівною 0,93 г/см^3.

Розв'язання:

Об'єм матеріалу з парафіном дорівнює за законом Архимеда втраті його маси при зважуванні у воді

$$V = 55 - 15 = 40 \ см^3.$$

Маса парафіну

$$m_{\text{п}} = 55 - 53 = 3 \text{ г}.$$

Об'єм парафіну

$$V_{\text{п}} = \frac{m}{\rho_{\text{п}}} = \frac{3}{0{,}93} = 3{,}23 \text{ см}^3.$$

Об'єм матеріалу без парафіну

$$V = 40 - 3{,}23 = 36{,}77 \ см^3.$$

Середня щільність матеріалу

$$\rho_{\text{сер}} = \frac{m}{V} = \frac{52}{36{,}77} = 1{,}41 \text{ г/см}^3.$$

Відповідь: середня щільність матеріалу дорівнює 1,41 г/см^3.

13. Кузов автомашини, що має розміри 2,8х1,8х0,6 м заповнений на ⅔ своєї висоти щебенем. Маса автомашини без щебеню дорівнює 3 т, а з щебенем 5,86 т. Розрахувати насипну щільність і пустотність щебеню, якщо його істинна щільність дорівнює 2,7 г/см^3.

Розв'язання: Висота шару щебеню у кузові автомашини дорівнює

$$h = 60 \cdot \frac{2}{3} = 40 \text{ см} = 0{,}4 \text{ м}.$$

Об'єм щебеню

$$V = 2{,}8 \cdot 1{,}8 \cdot 0{,}4 = 2 \text{ м}^3.$$

Маса щебеню

$$m = 5{,}86 - 3 = 2{,}86 \text{ т} = 2860 \text{ кг}.$$

Насипна щільність щебеню

$$\rho_{\text{н}} = \frac{m}{V} = \frac{2860}{2} = 1430 \text{ кг/м}^3.$$

Пустотність щебеню

$$V_{\text{П}} = 1 - \frac{\rho_{\text{н}}}{\rho_{\text{сер}}} \cdot 100\% = (1 - \frac{1430}{2700}) \cdot 100\% = 47\%.$$

Відповідь: насипну щільність і пустотність щебеню, відповідно, дорівнюють 1430 кг/м^3 і 47%.

14. Кубик із газосилікату з розміром ребра 15 см у абсолютно сухому стані важив 2,7 кг, а після знаходження у воді – 2,95 кг. Визначити ступінь заповнення пор зразка водою, якщо істинна щільність газосилікату 2,68 г/см³.

Розв'язання: Об'єм кубика із газосилікату

$$V = a^3 = 15^3 = 3375 \text{ см}^3.$$

Середня щільність газосилікату в абсолютно сухому стані

$$\rho_{\text{сер}} = \frac{m}{V} = \frac{2700}{3375} = 0{,}8 \text{ г/см}^3 = 800 \text{ кг/м}^3.$$

Пористість газосилікату

$$\text{П} = (1 - \frac{\rho_{\text{сер}}}{\rho}) \cdot 100\% = (1 - \frac{0{,}8}{2{,}68}) \cdot 100\% = 70{,}2\%.$$

Вікрита пористість або водопоглинання за об'ємом

$$\text{В}_V = \frac{m_{\text{нас}} - m_{\text{сух}}}{V_{\text{мат}} \cdot \rho_{\text{води}}} \cdot 100\% = \frac{2950 - 2700}{3375} \cdot 100 = 7{,}4\%.$$

Ступінь заповнення пір водою оцінюється коефіцієнтом насичення пір водою

$$k_{\text{н}} = \frac{\text{В}_V}{\text{П}} = \frac{7{,}4}{70{,}2} = 0{,}105.$$

Відповідь: Пори заповнені водою на 10,5%.

15. Водопоглинання бетону за масою та об'ємом відповідно 3,4% та 8,3%. Розрахувати пористість бетону, якщо його істинна щільність 2,64 г/см³.

Розв'язання: Виразимо відносну щільність бетону із формули

$$\text{В}_V = \text{В}_m \cdot d = \text{В}_m \cdot \frac{\rho_{\text{сер}}}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}},$$

тоді

$$d = \frac{В_V}{В_m} = \frac{8,3}{3,4} = 2,44.$$

Середня щільність бетону

$$\rho_{сер} = d \cdot \rho_{H_2O} = 2,44 \cdot 1000 = 2440 \text{ кг/м}^3.$$

Пористість бетону

$$П = (1 - \frac{\rho_{сер}}{\rho}) \cdot 100\% = (1 - \frac{2440}{2640}) \cdot 100\% = 8\%.$$

Відповідь: Пористість бетону дорівнює 8%.

16. Визначити пористість цементного каменю, якщо вміст води при замішуванні портландцементу був 32%, а кількість хімічно зв'язаної води склала 20% від маси цементу. Істинна щільність цементу дорівнює 3100 кг/м³.

Розв'язання: Склад цементного тіста за масою

$$Ц : В = 1 : 0,32.$$

Абсолютний об'єм цементного тісту

$$V_т = \frac{m_ц}{\rho_ц} + \frac{m_{H_2O}}{\rho_{H_2O}} = \frac{1000}{3100} + 0,32 = 0,64 \text{ м}^3.$$

Абсолютний об'єм цементного каменю

$$V_{ц.к.} = \frac{m_ц}{\rho_ц} + m_{зв\ H_2O} = \frac{1000}{3100} + 0,2 = 0,52 \text{ м}^3.$$

Відносна щільність цементного каменю

$$\frac{V_{ц.к.}}{V_т} = \frac{0,52}{0,64} = 0,81.$$

Пористість цементного каменю

$$V_{пор} = (1 - \frac{V_{ц.к.}}{V_т}) \cdot 100\% = (1 - 0,81) \cdot 100\% = 19\%.$$

Пори в цементному камені утворюються за рахунок різниці між загальною кількістю води замішування, що визначається водоцементним відношенням, і кількістю води хімічно пов'язаної (гідратної), використаної на утворення цементного каменю.

Відповідь: Пористість цементного каменю дорівнює 19%.

17. Камнеобробний завод випускає мармурові облицювальні плити розміром 600х600х25 мм, масою в сухому стані 24,3 кг. Визначити фізико-механічні властивості цих виробів: істинну (ρ) та середню ($\rho_{сер}$) щільності плит, загальну, відкриту та закриту пористості (П, $П_{відкр}$, $П_{закр}$), водопоглинання за масою та за об'ємом ($В_m$, $В_v$).

Додаткові відомості:

● при визначенні істинної щільності за допомогою приладу Ле-Шательє після засипки в об'ємомер 50 г мармурового борошна рівень інертної рідини в приладі досяг 18 мл;

● маса плит у водонасиченому стані становить 24,4 кг;

Розв'язання: Істинну щільність визначають за даними, що отримані за допомогою прилада Ле Шательє

$$\rho = \frac{m_{мат}}{V_{води}} = \frac{50}{18} = 2{,}78 \text{ г/см}^3.$$

Середню щільність визначають за відношенням маси

сухого матеріалу до його об'єму

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{24300}{60 \cdot 60 \cdot 2{,}5} = \frac{24300}{9000} = 2{,}7 \text{ г/см}^3.$$

Загальна пористість

$$П = (1 - \frac{\rho_{сер}}{\rho}) \cdot 100\% = \left(1 - \frac{2{,}7}{2{,}78}\right) \cdot 100\% = 2{,}9\%.$$

Відкрита пористість $П_{відкр}$ дорівнює водопоглинанню за об'ємом $В_V$, тому спочатку визначаємо $В_V$

$$В_V = \frac{m_{нас} - m_{сух}}{V_{мат} \cdot \rho_{води}} \cdot 100\% = \frac{24400 - 24300}{9000} \cdot 100 = 1{,}11\%.$$

Тоді закрита пористість дорівнює

$$П_{закр} = П - П_{відкр} = 2{,}9 - 1{,}11 = 1{,}79\%.$$

Водопоглинання за масою

$$В_m = \frac{m_{нас} - m_{сух}}{m_{сух}} \cdot 100\% = \frac{24{,}4 - 24{,}3}{24{,}3} \cdot 100 = 0{,}4\%.$$

Відповідь: Істинна щільність – 2,78 г/см^3; середня щільність – 2,7 г/см^3; загальна пористість – 2,9%; відкрита пористість – 1,11%; закрита пористість – 1,79%; водопоглинання за масою – 0,41%; водопоглинання за об’ємом – 1,11%.

Завдання для самоконтролю

1. Що таке істинна щільність матеріалу, від чого вона залежить, як визначається?
2. Чому для визначення істинної щільності кам'яний матеріал подрібнюють?
3. Що спільного і що різного між істинною та середньою щільністю матеріалу?
4. Що таке середня щільність матеріалу, від чого залежить, як визначається?
5. Що таке і як визначається загальна, відкрита та закрита пористість матеріалу?
6. Яка існує залежність між водопоглинанням за об’ємом та загальною пористістю матеріалу? Чи завжди ця залежність справедлива?
7. Який вплив має відкрита і закрита пористість на морозостійкість матеріалу?
8. Який вплив має відкрита та закрита пористість на тепло- та звукопровідність матеріалів?
9. Що таке та як визначається вологість матеріалу?
10. Що таке водопоглинання матеріалу, від чого залежить, як визначається?

11. Завод силікатних виробів випускає дрібні стінові блоки з силікатного пористого бетону (газосилікату) розміром 600х300х200 мм і масою в сухому стані 21,6 кг. Визначити наступні фізико-механічні властивості блоків: істинну і середню щільність, загальну, відкриту та закриту пористість, водопоглинання за масою та за об’ємом.

Додаткові відомості:

● маса пікнометра – 90 г, пікнометра з наважкою меленого газосилікату – 125 г, пікнометра з інертною рідиною – 300 г, пікнометра з наважкою газосилікату та рідиною – 321 г;

● маса блоку у водонасиченому стані – 30 кг.

3. ГІПСОВІ І ВАПНЯНІ В'ЯЖУЧІ РЕЧОВИНИ

Теоретична частина

3.1. Загальні відомості про неорганічні в'яжучі речовини

Неорганічні в'яжучі речовини – це порошкоподібні матеріали, які утворюють при змішуванні з водою пластично-в'язку масу, яка з часом затвердіє у міцне камнеподібне тіло. Для неорганічних в'яжучих речовин характерні наступні ознаки:

- гідрофільність;
- здатність утворювати з водою тістоподібну масу;
- здатність переходити у твердий стан без дії зовні. Іноді для прискорення твердіння цементні вироби підлягають тепловологій обробці.

За умовами твердіння та водостійкості продуктів неорганічні в'яжучі речовини діляться на повітряні і гідравлічні. До повітряних в'яжучих речовин відносять гіпсові в'яжучі, повітряне вапно. *Повітряні в'яжучі речовини* після змішування з водою твердіють на повітрі і продукти твердіння нестійкі по відношенню до води.

До гідравлічних в'яжучих речовин відносяться портландцемент, глиноземистий цемент, гідравлічне вапно. *Гідравлічні в'яжучі речовини* після первинного схоплювання на повітрі надалі можуть твердіти і під водою. Продукти твердіння зберігають міцність у воді.

3.2. Гіпсові в'яжучі речовини

Гіпсові в'яжучі речовини − це повітряні в'яжучі речовин,. що отримують тепловою обробкою двоводного гіпсу $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ та помолом обпаленого продукту. Вони складаються з напівводного гіпсу $CaSO_4 \cdot 0,5H_2O$ та ангідриту $CaSO_4$.

Залежно від температури обробки гіпсові в'яжучі діляться на:

● низьковипалені гіпсові. Температура випалу 110–180 ºС. Головний компонент $CaSO_4 \cdot 0,5H_2O$;

● високовипалені (ангідритові). Температура випалу 600–900 ºС. Головний компонент $CaSO_4$.

Сировина для здобуття гіпсових в'яжучих: природний гіпс $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ і природний ангідрит $CaSO_4$.

В загальному виді дегідратація $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ має вид:

$$CaSO_4 \cdot 2H_2O \xrightarrow{-1.5H_2O, t^oC} CaSO_4 \cdot 0,5H_2O \xrightarrow{-0,5H_2O, t^oC} CaSO_4.$$

Тут відмічено два кристалогідрати і ангідрит. Але за даними досліджень $CaSO_4$ може існувати в 8 модифікаціях. Нагрівання до 400–800 °С переводить всі модифікації при повній перебудові кристалічних решіток в нерозчинний ангідрит, який практично не схоплюється і не твердіє. При t = 800–1000 °С $CaSO_4$ частково розкладається на CaO, SO_2 і O_2:

$$2CaSO_4 \rightarrow 2CaO + 2SO_2 + O_2 .$$

Мала кількість CaO (2–3 %) надає каталітичну дію на схоплення та твердіння $CaSO_4$. Цей продукт називається естріх-гіпсом.

На практиці отримують 3 види гіпсових в'яжучих речовин:

● будівельний гіпс;

● ангідритове в'яжуче;

● високообпалений гіпс (естріх-гіпс).

Будівельний гіпс – це речовина, що складається з напівводного гіпсу і отримана випаленням природного гіпсу $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ у відкритих ємностях з подрібненням продукту в тонкий порошок:

$$CaSO_4 \cdot 2H_2O \xrightarrow{130\text{-}150°C} CaSO_4 \cdot 0,5H_2O + 1,5\ H_2O$$

Температура випалення природного гіпса $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ 130–150 °С. Оптимальна витримка при 140–150 °С протягом 3–4 годин сприяє зменшенню водопотреби продукту і збільшенню його міцності. Цьому ж сприяє добавка 0,1–0,15% розчину NaCl пульверизацією в казан. Підвищення міцності гіпсу проводять при термічній обробці в автоклавах або кип'ятінням в розчинах $CaCl_2$. В цьому випадку утворюється модифікація $CaSO_4 \cdot 0,5H_2O$, що володіє набагато більшою міцністю

Ангідритове в'яжуче отримують випаленням при температурах 600–700° С. Головний компонент – нерозчинний ангідрит $CaSO_4$, який в суміші з водою повільно схоплюється і майже не твердіє. Для активізації його твердіння застосовують добавки сульфатів Na_2SO_4, K_2SO_4, $FeSO_4$.

Естріх-гіпс отримують випаленням при 900–1100 °С. Основні компоненти: нерозчинний $CaSO_4$ і CaO. Вміст CaO збільшується із зростанням температури.

Схоплювання і твердіння гіпсу обумовлене переходом отриманих продуктів при взаємодії з водою в гідрати за реакцією гідратації. Теорія твердіння була розроблена Ле-Шателье (1887 р.) і продовжена Бойковим. Приведемо реакції гідратації для різних видів гіпсу. Будівельний гіпс:

$$CaSO_4 \cdot 0{,}5H_2O + 1{,}5H_2O \rightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O.$$

Ангідритове в'яжуче:

I стадія: $CaSO_4 + 0{,}5H_2O \rightarrow CaSO_4 \cdot 0{,}5H_2O$;

II стадія: $CaSO_4 \cdot 0{,}5H_2O + 1{,}5H_2O \rightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O$.

На стадії 2 продукт $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ виділяється з розчину у вигляді високодисперсних частинок, утворюючих колоїдну масу у вигляді гелю. Це викликає твердіння системи та її зміцнення. Кількість розчиненого $CaSO_4 \cdot 0{,}5H_2O$ при цьому зменшується, що створює можливість для розчинення нових порцій $CaSO_4 \cdot 0{,}5$ H_2O.

Стадія 3 – перекристалізація. Частинки $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ зростають і переплітаються. Це обумовлює подальше твердіння і підвищення міцності системи. Ці стадії не слідують одна за одною, а накладаються, протікають паралельно. Міцність затверділого гіпсу у міру висихання збільшується, що пояснюється випаром води.

3.3. Види вапна

Будівельне вапно – продукт, що отримується з Ca-Mg-карбонатних порід випаленням до можливо повного видалення CO_2 і що складається з CaO. Випалення до спікання не доводять. Спікання – часткове плавлення компонентів матеріалу, при

якому частинки зчіплюються між собою. Розрізняють негашене вапно CaO і гашене вапно $Ca(OH)_2$.

Отримання вапна засновано на реакціях:

$$CaCO_3 \xrightarrow{t^\circ C} CaO + CO_2, \; t = 800\text{-}1000^\circ C;$$

$$\underset{\text{доломіт}}{CaCO_3 \cdot MgCO_3} \xrightarrow{t^\circ C} CaO + MgO + 2CO_2\uparrow$$

Склад негашеного вапна: CaO, MgO, $CaCO_3$, що не розклався, силікати, алюмінати, ферити Ca і Mg.

Гідратне гашене вапно – високодисперсний порошок, що отримується гасінням негашеного вапна (повітряного) пароподібною або рідкою водою:

$$CaO + MgO + 2H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + Mg(OH)_2.$$

Гасіння вапна йде найшвидше при використанні чистого вапна, в якому більше вміст CaO. Наявність перепалу, значної кількості MgO (мінерал периклаз) і глинистих домішок уповільнює швидкість гасіння. Розглянемо небажаний вплив MgO. Периклаз – крупні кристали, які повільно реагують з водою. Утворення $Mg(OH)_2$ може завершуватися вже в отверділих виробах:

$$CaO + MgO + 2H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + Mg(OH)_2,$$

$$MgO + H_2O \rightarrow Mg(OH)_2.$$

Отримання гідравлічного вапна. При випаленні карбонатних порід, що містять глини, зазнають зміни не лише карбонати, але і гідросилікати. Основна частина глини – мінерал каолініт $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ при випаленні зазнає перетворення:

$$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O \rightarrow Al_2O_3 \cdot SiO_2(\text{безводн.}) + SiO_2\,(\text{аморфн.}),$$

$$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O \rightarrow Al_2O_3 + SiO_2\,(\text{аморфн.}).$$

У печі між розпушеними продуктами можуть йти реакції в твердому стані:

$$CaO + SiO_2 + Al_2O_3 \xrightarrow{1200^o C} CaO \cdot Al_2O_3;\; 2CaO \cdot 2SiO_2,$$

$$CaO + SiO_2 + Al_2O_3 \xrightarrow{1250-1300^o C} 5CaO \cdot SiO_2;\ 3\ CaO \cdot Al_2O_3.$$

Здобуття в'яжучих матеріалів на основі вапна має наступні стадії. Обпалене негашене вапно виходить з печі у вигляді грудок. Отримання в'яжучих матеріалів досягається помелом або диспергуванням при гасінні водою. Вибір методу подрібнення залежить від складу негашеного вапна, яке може бути двох видів:

– *повітряне вапно* складається з 90–95% CaO і MgO і ≤ 10 % силікатів і алюмінатів Ca;

– *гідравлічне вапно* містить 70–80% силікатів і алюмінатів кальцію, останнє – CaO, MgO.

Самі назви говорять про те, що повітряне вапно відноситься до повітряних в'яжучих, а гідравлічне – до гідравлічних. Гідравлічне вапно диспергують помелом, тому що гаситися водою гідравлічне вапно може лише частково. Гідравлічне вапно здатне твердіти на повітрі і у воді. Гідравлічні властивості пояснюються присутністю силікатів і алюмінатів Ca. Чим їх більше, тим більше гідравлічні властивості, тим швидше твердіє вапно і вище його міцність.

Твердіння вапна негашеного і гідравлічного на повітрі протікає за реакцією:

$$CaO + CO_2 + H_2O \rightarrow CaCO_3 + H_2O.$$

Гашене вапно твердіє за реакцією:

$$Ca(OH)_2 + H_2O + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + 2H_2O.$$

У обох випадках виділяється вода, тому вапняна штукатурка довго сохне.

Практична частина

3.4. Розрахунки за перетворенням гіпсових в'яжучих речовин

1. Визначити масу напівводного гіпсу, отриманого після термічної обробки у варильному казані 15 т гіпсового каменю.

Розв'язання: Записують рівняння реакції і визначають молярні маси сполук

$$\overset{15000}{CaSO_4 \cdot 2H_2O} \rightarrow \overset{x}{CaSO_4 \cdot 0{,}5H_2O} + 1{,}5H_2O$$
$$172 \qquad\qquad 145$$

Із 15 т гіпсового каменю можна отримати масу напівводного гіпсу

$$\frac{15000 \cdot 145}{172} = 12645{,}3 \text{ кг}$$

Відповідь: Отримано 12645, 3 кг напівввводного гіпсу.

2. Будівельний гіпс після випалу поряд з β-напівгідратом містить у своєму складі 5% зневодненого напівгідрату, 3% розчинного ангідриту, 2% двогідрату та 3% SiO_2. Визначити втрату води вихідною сировиною при випаленні.

Розв'язання: Приймають кількість продукту за 1000 кг, тоді

$CaSO_4 \cdot 0{,}5H_2O$ – 87% – 870 кг;
$CaSO_4$ – (5+3)% = 8% – 80 кг;
$CaSO_4 \cdot 2H_2O$ – 2% – 20 кг;
SiO_2 – 3% – 30 кг.

а) Визначають масу двогідрату, що необхідна для утворення 80 кг ангідріту

$$\overset{x}{CaSO_4 \cdot 2H_2O} \rightarrow \overset{80}{CaSO_4} + \overset{y}{2H_2O}$$
$$172 \qquad 136 \qquad 36$$

$m(CaSO_4 \cdot 2H_2O) = x = \frac{172 \cdot 80}{136} = 101{,}18$ кг.

б) Маса води, що виділилася складає

$$y = \frac{101{,}18 \cdot 36}{172} = 21{,}18 \text{ кг}$$

в) Визначають масу $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, що необхідна для утворення 870 кг напівгіддрату

$$\underset{172}{\overset{x}{CaSO_4 \cdot 2H_2O}} \rightarrow \underset{145}{\overset{870}{CaSO_4 \cdot 0{,}5H_2O}} + \underset{27}{\overset{y}{1{,}5H_2O}}$$

$$x = \frac{172 \cdot 870}{145} = 1032 \text{ кг}$$

г) Маса води, що виділилася із 1032 кг двогідрату, дорівнює

$$y = \frac{1032 \cdot 27}{172} = 162 \text{ кг}$$

д) Розраховують масу вихідної сировини

$$m_{\text{сировини}} = 1032 + 10{,}18 + 20 + 30 + 1183{,}18 \text{ кг}$$

є) Загальна маса води дорівнює

$$m_{\text{води}} = 162 + 21{,}18 = 183{,}18 \text{ кг}$$

е) Визначають втрату води сировиною

$$\text{Втрата води} = \frac{183{,}18 \cdot 100}{1183{,}18} = 15{,}48\%.$$

Відповідь: При випаленні сировина втратила воду, що складає 15,48% загальної маси.

3. При випалі гіпсового каменю з вологістю 5% отримано 1 т будівельного гіпсу. Визначити необхідну масу вихідного гіпсового каменю, якщо в гіпсі міститься 2% SiO_2 та 6% $CaSO_4$.

Розв'язання: Записують рівняння реакцій з усіма даними

$$\underset{172}{\overset{x}{CaSO_4 \cdot 2H_2O}} \rightarrow \underset{145}{\overset{920}{CaSO_4 \cdot 0{,}5H_2O}} + 1{,}5H_2O$$

$$\underset{172}{\overset{y}{CaSO_4 \cdot 2H_2O}} \rightarrow \underset{136}{\overset{60}{CaSO_4}} + 2H_2O$$

Для утворення 920 кг (92%) напівгідрату і 60 кг (6%) безводного $CaSO_4$ необхідно мати масу двогідрата

$$\frac{172 \cdot 920}{145} + \frac{172 \cdot 60}{136} 1091{,}31 + 75{,}88 = 1167{,}19 \text{ кг.}$$

З урахуванням вологості (5%) та домішок SiO_2 (20 кг) вихідна маса гіпсового каменю складе

$$(1167{,}19 + 20) + (1167{,}19 + 20)\frac{5}{100} = 1246{,}55 \text{ кг}$$

Відповідь: Маса гіпсового каменю дорівнює 1246,55 кг.

4. Нормальна густота гіпсового тесту дорівнює 59%. Скільки необхідно взяти води та гіпсу для отримання 10 кг гіпсового тісту нормальної густоти?

Розв'язання: Нормальна густота гіпсового тісту оцінюють в % як відношення маси гіпсу до маси води замішування для отримання гіпсового тісту стандартної консистенції, при якій діаметр розпливу, визначений віскозиметром Суттарда, становить 120 мм. Приймають за x необхідну масу гіпсу, тоді необхідна маса води дорівнюватиме $0{,}59x$. У сумі вони мають становити 10 кг. Отримують рівняння

$$x + 0{,}59x = 10,$$

звідси

$$x = \frac{10}{1{,}59} = 6{,}3.$$

Маса води замішування складає $0{,}59x$ або 3,72 л.

Відповідь: Для отримання 10 кг гіпсового тісту нормальної густоти необхідно взяти 3,72 л води.

5. Розрахувати міцність технічного гіпсу при нормальній густоті (НГ) 42%, якщо будівельний гіпс, що має НГ = 65%, показав при випробуваннях на стиск міцність 11,0 МПа, а збільшення міцності становить 1,0 МПа при зменшенні НГ на кожний відсоток.

Розв'язання: Різниця у водопотребах будівельного та високоміцного гіпсу складе: 65 – 42 = 23%.

Приріст міцності: 23·1,0 = 23 МПа.

Міцність високоміцного гіпсу 11 + 23 = 34 МПа.

Відповідь: Міцність технічного гіпсу при НГ = 42% складає 23 МПа.

6. Коефіцієнт розм'якшення будівельного гіпсу дорівнює 0,35. Міцність зразків на стиск у водонасиченому стані дорівнює 3,8 МПа. Визначити міцність гіпсу у сухому стані.

Розв'язання:

$$K_{\text{р}} = \frac{R_{\text{стисн}}^{\text{нас}}}{R_{\text{стисн}}^{\text{сух}}} = 0{,}35 = \frac{3{,}8}{R_{\text{стисн}}^{\text{сух}}},$$

$$R_{\text{стисн}}^{\text{сух}} = \frac{3{,}8}{0{,}35} = 10{,}86 \text{ МПа}.$$

Відповідь: Міцність гіпсу у сухому стані дорівнює 10,86 МПа.

7. В процесі гідратації гіпсового каменю за рахунок вапна при виробництві вапняно-гіпсової суміші отримано 1000 кг суміші, що складається з 40% $CaSO_4 \cdot 0{,}5H_2O$, 30,6% $Ca(OH)_2$, 15% CaO і 14,4% домішок. Визначити масу вихідних матеріалів, взятих для отримання гіпсовапняної суміші, та орієнтовну активність негашеного вапна, якщо всі домішки були внесені з останнім.

Розв'язання: Для приготування гіпсовапняної суміші був використаний двогідрат

$$m(\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}) = \frac{172 \cdot 400}{145} = 474{,}48 \text{ кг}$$

До складу негашеного вапна, взятого для гіпсовапняної суміші входило: 144 кг домішок, 150 кг кальцій оксиду, який

перейшов без змін до гіпсовапняної суміші, і 150 кг кальцій оксиду, з якого вийшло 306 кг $Ca(OH)_2$. Кількість останнього CaO обчислюють, виходячи з рівняння реакції

$$\underset{56}{\overset{x}{CaO}} + H_2O \rightarrow \underset{74}{\overset{306}{Ca(OH)_2}}$$

$$m(\text{CaO}) = \frac{56 \cdot 306}{74} = 231{,}5 \text{ кг}.$$

Таким чином, вихідна маса негашеного вапна дорівнює

$$m(\text{CaO})_{\text{вихідн}} = 144 + 150 + 231{,}5 = 525{,}5 \text{ кг}.$$

Активність вапна можна розрахувати за відношенням маси чистого CaO у вихідній масі до вихідної маси вапна з домішками

$$A = \frac{150 + 231{,}5}{525{,}5} \cdot 100 = 72{,}6\%.$$

Відповідь: Вихідна маса $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ – 474,48 кг;
вихідна маса негашеного вапна CaO – 525,5 кг;
орієнтована активність негашеного вапна – 72,6%.

8. Визначити кількість зв'язаної води за повної гідратації 1 т напівводного гіпсу.

Розв’язання: Розраховують масу води, що міститься у 1000 кг напівводного гіпсу ($0{,}5H_2O$)

$$145 – 1000$$
$$9 – x$$

$$x = \frac{9000}{145} = 62 \text{ кг}.$$

Для утворення двоводного гіпсу води потрібно втричі більше ($1{,}5H_2O$) або $62 \cdot 3 = 186$ кг. Тоді маса повністю гідратованого гіпсу дорівнює 1000 + 186 = 1186 кг.

Маса води у двоводному гіпсі 62+186=248 кг, що складає

$$1186 – 100\%$$
$$248 – x$$

$$x = \frac{24800}{1186} = 20{,}9\%.$$

Відповідь: Частка зв'язаної води у двоводному гіпсі складає 20,9%.

3.5. Розрахунки за перетворенням вапняних в'яжучих речовин

1. Визначити вихід вапна та його активність, якщо сировина містить у своєму складі 65% $CaCO_3$, 26% $CaCO_3 \cdot MgCO_3$ та 9% безводних домішок. Дисоціацію карбонатних порід прийняти повною.

Розв'язання: Розраховують виходи продукту в реакціях декарбонізації вапняку

$$\underset{100}{CaCO_3} \rightarrow \underset{56}{CaO} + CO_2\uparrow$$

$$CaO = \frac{56 \cdot 65}{100} = 36{,}4\%$$

і доломіту

$$\underset{184}{CaCO_3 \cdot MgCO_3} \rightarrow \underset{56}{CaO} + \underset{40}{MgO} + 2CO_2\uparrow$$

$$CaO + MgO = \frac{56 \cdot 26}{184} + \frac{40 \cdot 26}{184} = 7{,}91 + 5{,}65 = 13{,}56\%.$$

Вихід вапна дорівнює

$$36{,}4 + 13{,}56 + 9 = 58{,}96\%.$$

Активність вапна складає

$$A = \frac{36{,}4 + 13{,}56}{58{,}96} \cdot 100 = 85\%.$$

Відповідь: Вихід вапна – 58,96%;
активність вапна – 85%.

2. Встановити, як зміниться об'єм твердої фази при випалі вапняку, якщо абсолютні щільності $CaCO_3$ і CaO рівні відповідно 2730 і 3400 кг/м^3.

Розв'язання: Записують рівняння декарбонізації вапняку і молярні маси вихідної речовини та продукту реакції

$$\underset{100}{CaCO_3} \rightarrow \underset{56}{CaO} + CO_2\uparrow$$

Розраховують молярні об'єми $CaCO_3$ і CaO

$$V_{CaCO3} = \frac{M}{\rho} = \frac{100}{2{,}73} = 36{,}63 \text{ см}^3;$$

$$V_{CaO} = \frac{56}{3{,}4} = 16{,}47 \text{ см}^3.$$

По відношенню до вихідного об'єм речовини зменшився у

$$\frac{36{,}63}{16{,}47} = 2{,}22 \text{ рази.}$$

Відповідь: при випалі вапняку об'єм твердої фази зменшився у 2,22 рази.

3. Яка кількість води теоретично необхідна для гасіння негашеного вапна, що має активність 85% (причому 15% від маси вапна становить оксид магнію MgO)?

Розв'язання: Записують рівняння гідратації CaO і MgO і молярні маси вихідної речовини і води

$$\underset{56}{CaO} + \underset{18}{H_2O} \rightarrow Ca(OH)_2$$

$$\underset{40}{MgO} + \underset{18}{H_2O} \rightarrow Mg(OH)_2$$

Для гасіння 15% магній оксиду необхідно води $\frac{15 \cdot 18}{40} = 6{,}75\%$ маси вапна.

Для гасіння 85 – 15 = 70% кальцій оксиду необхідно води $\frac{70 \cdot 18}{56} = 22{,}5\%$.

Загальна частка води від маси вапна

$$22,5 + 6,75 = 29,25\%.$$

Відповідь: Частка води складає 29,25% від маси вапна.

4. Скільки вапняного тісту (за об'ємом та масою), що містить 50% твердої речовини з істинною щільністю 2200 кг/м^3 та 50% води (за масою), можна отримати з 10 т вапна-пушонки? Якою є його густина?

Розв'язання: Розраховують масу вапняного тіста

$$10 + 10 = 20 \text{ т} = 20000 \text{ кг}.$$

Об'єм тісту складе

$$V_{\text{т}} = \frac{10000}{2,2 \cdot 10^3} + \frac{10000}{10^3} = 14,5 \text{ м}^3.$$

Густина тісту дорівнює

$$\rho_{\text{т}} = \frac{20000}{14,5} = 1379,31 \text{ кг/м}^3.$$

Відповідь: Маса вапняного тіста 20000 кг;
об'єм вапняного тіста – 14,5 м^3;
густина вапняного тіста – 1379,31 кг/м^3.

5. Розрахувати співвідношення між вапном активністю 70% і меленим піском, що містить 90% кремнезему, для виготовлення вапняно-піщаного в'яжучого автоклавного твердіння, виходячи з повного зв'язування кремнезему в низькоосновні гідросилікати кальцію типу $CaO \cdot SiO_2 \cdot H_2O$.

Розв'язання: Згідно з формулою гідратованого кальцій силікату

$$\underset{56}{CaO} \cdot \underset{60}{SiO_2} \cdot H_2O$$

на одну частину кальцій оксиду необхідно 60/56 кремнезема. Але у вапні міститься 70% CaO, а у піску – 90% SiO_2. Звідси співвідношення за масою вапна і піску буде

$$\frac{56}{0,7} : \frac{60}{0,9} = 1 : 0,83.$$

Відповідь: співвідношення «вапно : пісок» = 1 : 0,83.

6. У вапняку, крім $CaCO_3$, міститься 6% SiO_2, 1% Al_2O_3 та 2% Fe_2O_3. Визначити гідравлічний модуль і дати висновок про гідравлічність вапна.

Розв'язання: Визначають загальний вміст кальцій оксиду після випалу вапняку

$$\frac{56}{100}\%CaCO_3 = \frac{56}{100}[100\% - (\%SiO_2 + \%Al_2O_3 + \%Fe_2O_3)] =$$

$$= \frac{56 \cdot 91\%}{100} = 50{,}96\%.$$

Гідравлічний модуль дорівнює

$$ГМ = \frac{\%CaO}{\%(SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3)} = \frac{50{,}96}{6+1+2} = 5{,}66.$$

Вапно слабогідравлічне, так як

$$4{,}5 < 5{,}66 < 9.$$

Відповідь: ГМ = 5,66, вапно слабогідравлічне.

Завдання для самоконтролю

1. Назвіть групи мінеральних в'яжучих речовин за умовами твердіння і стійкістю продукту твердіння.
2. Які в'яжучі речовини відносять до повітряних в'яжучих речовин?
3. Що називають будівельним гіпсом? Яка головна речовина у виробництві будівельного гіпсу?
4. Головною сполукою в ангідритовому цементі є: а) $CaSO_4 \cdot 0{,}5H_2O$; б) $CaSO_4$; в) $CaSO_4 \cdot 2H_2O$.
5. Головна речовина у сировині для виробництва повітряного вапна є: а) $CaCO_3 \cdot MgCO_3$; б) $CaSO_4$; в) $Ca(OH)_2$; г) $CaCO_3$.
6. Головний мінерал, що міститься у сировині для виробництва CaO, є а) діатоміт; б) доломіт; в) кальцит.
7. У яких повітряно-водних умовах твердіє повітряне вапно?

8. Вапно $Ca(OH)_2$ називають: а) пушонкою; б) негашеним (або комовим); в) гашеним.

9. У яких процесах отримують негашене і гашене вапно відповідно?

10. За яких температурних умов отримують негашене вапно та естріх-гіпс?

11. При випалі гіпсового каменю з вологістю 3,7% отримано 3 т будівельного гіпсу. Визначити необхідну масу вихідного гіпсового каменю, якщо в гіпсі міститься 2,8% SiO_2 та 5,6% $CaSO_4$.

12. В процесі гідратації гіпсового каменю за рахунок вапна при виробництві вапняно-гіпсової суміші отримано 4,2 т суміші, що складається з 43% $CaSO_4 \cdot 0,5H_2O$, 29% $Ca(OH)_2$, 17% CaO і 11% домішок. Визначити масу вихідних матеріалів, взятих для отримання гіпсовапняної суміші, та орієнтовну активність негашеного вапна, якщо всі домішки були внесені з останнім.

13. Яка кількість води теоретично необхідна для гасіння негашеного вапна, що має активність 86,4% (причому 13,6% від маси вапна становить оксид магнію MgO)?

14. Визначити масу напівводного гіпсу, отриманого після термічної обробки у варильному казані 12,7 т гіпсового каменю.

15. Визначити кількість зв'язаної води за повної гідратації 2,5 т напівводного гіпсу.

16. У вапняку, крім $CaCO_3$, міститься 4,9% SiO_2, 2,3% Al_2O_3 та 0,9% Fe_2O_3. Визначити гідравлічний модуль і дати висновок про гідравлічність вапна.

4. СИТОВИЙ АНАЛІЗ

Теоретична частина

Визначення гранулометричного складу має дуже важливе технічне та гігієнічне значення. Розміри частинок та їх розподіл по крупності впливають майже на всі властивості пилоподібних матеріалів. Наприклад, на їх реологічні (плинність), теплові та реакційно-кінетичні характеристики матеріалів. Розміри зерен та гранулометричний склад є також одним із факторів оцінки впливу запиленості повітря на людину та вибору відповідних засобів боротьби з пилом. Діапазон розмірів частинок, що зустрічаються при аналізі гранулометричного складу, охоплює понад п'ять порядків – від крупнозернистих матеріалів до колоїдів. Звідси видно не лише важливість цієї галузі, а й її проблематика.

За загальною класифікацією сипучі матеріали залежно від розмірів частинок підрозділяють на 5 груп: кускові (d_{max} > 10 мм); грубозернисті (d_{max} = 2−10 мм); дрібнозернисті (d_{max} = 0,5−2 мм); порошкоподібні (d_{max} = 0,05−0,5 мм); пилоподібні (d_{max} <0,05 мм).

При аналізі гранулометричного складу підлягають розв'язанню дві задачі: визначення розмірів частинок та визначення частки у відсотках частинок різних класів крупності. Для вирішення другого завдання потрібен поділ частинок по крупності. Методи аналізу гранулометричного складу можна класифікувати так: дослідження під мікроскопом, ситовий аналіз, метод поділу частинок за швидкістю їх осадження (седиментаційний метод), лічильний метод, відцентровий метод, декантація, відсіювання. У тих випадках, коли розмір частинок матеріалу менше 5 мм і досягають мікронних розмірів для визначення гранулометричного складу всієї маси матеріалу проводять такі аналізи: ситовий, седиментаційний або мікроскопічний.

Ситовий аналіз заснований на механічному поділі частинок по крупності на решетах або ситах з отворами різної величини. На кожному сіті затримуються саме ті частинки, розміри яких більші за розмір отворів цього сита, але менші за розмір отворів

верхнього сита. Матеріал, що залишився на ситі після просіву називається «залишок», а пройшов через сито – «прохід». Ситові аналізи дозволяють визначити крупність частинок до 40 мкм (мінімальний розмір отворів застосовуваних сит).

Існує кілька систем стандартних сит. Послідовний ряд розмірів отворів сит, що застосовуються для грохочення або класифікації, називається *шкалою класифікації*, а відношення розмірів двох отворів сусідніх сит називається *модулем шкали*.

При великому та середньому грохочінні модуль дорівнює двом. Наприклад, набір сит з цим модулем складатиметься з сит з отворами розміром 50, 25, 12, 6 та 3 мм.

Для дрібніших сит застосовується стандартна система з модулем $\sqrt{2}$. У цій системі за основу прийнято сито 200 меш з отворами розміром 0,074 мм. *Меш* − це кількість отворів, що припадає на один лінійний дюйм (25,4 мм). Цей модуль використовується для сит з отворами розміром від 2,362 мм (8 меш) до 0,104 мм (150 меш). Користуючись модулем, можна визначити розмір отворів попереднього та наступного сит. Наприклад, якщо при модулі $\sqrt{2}$=1,414 є сито з отворами діаметром 0,074 мм, то попереднє сито цієї серії повинно мати отвори 0,104 мм, так як 0,074·1,414=0,104.

Для сит із більш вузькою шкалою класифікації застосовують стандартну систему сит із модулем $\sqrt[4]{2}$=1,189. Сита з цим модулем виготовляються від 0,104 до 0,043 мм (325 меш).

Полотно сита є сіткою з термічно обробленого дроту зі сплавів кольорових металів.

Середній розмір частинок $d_{i\ \text{сер}}$ i-тої фракції розраховується як середнє арифметичне між розмірами отворів d_i сита на якому фракція затрималася, і розмірами отворів d_{i-1} попереднього сита

$$d_{i\text{сер}} = \frac{d_i + d_{i-1}}{2}. \qquad (4.1)$$

Для ситового аналізу береться набір стандартних сит. Лабораторне стандартне сито є круглою обічайкою діаметром 200 мм і висотою 50 мм, в якій натягнута сітка. Сита виготовляють таким чином, щоб вставляючи одне сито в інше, можна було скласти комплект сит. Верхня частина цього

комплекту закривається кришкою, а нижня вставляється в піддон для прийому найдрібнішого класу, що пройшов через останнє сито комплекту (рис. 4.1).

Наважка матеріалу розміщується на верхньому ситі комплекту, потім весь набір сит струшується на механічному струшувачі протягом 10−30 хв. Розсів вважається закінченим, якщо при контрольному просіванні матеріалу вручну за 1 хв через сито проходить не більше 1% матеріалу, що знаходиться на ситі. Матеріал, що залишився на кожному ситі, зважують (m_i) і визначають вихід кожного класу (γ_i) в грамах і у відсотках від загальної маси проби

$$\gamma_i = \frac{m_i}{M} 100\%, \tag{4.2}$$

де m_i і M − відповідно маса проби даного класу крупності та вихідного матеріалу.

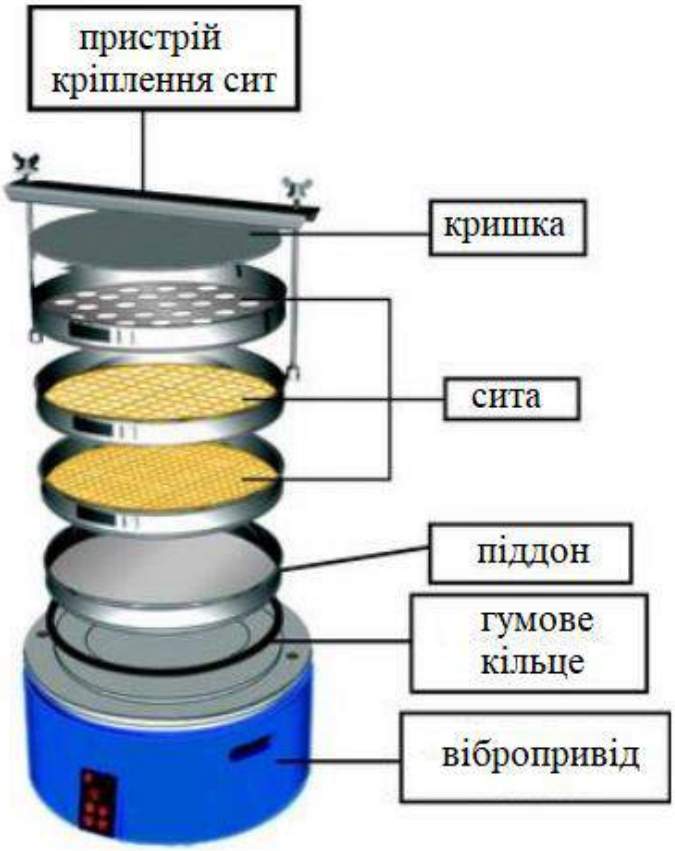


Рис. 4.1. Аналізатор ситовий

Матеріал, що залишився на ситі, позначається знаком плюс (+), а той, що пройшов через це сито, знаком мінус (−). Сумарні виходи розраховують шляхом послідовного підсумовування отриманих окремих виходів класів крупності, при цьому по плюсу підсумовування ведуть зверху вниз, а по мінусу − знизу вгору. Маючи значення розмірів отворів сит та сумарні виходи по плюсу та мінусу, будують сумарні характеристики крупності матеріалу (рис. 4.2). При цьому на осі абсцис відкладається нижнє значення розміру отворів сит класу крупності в мм.

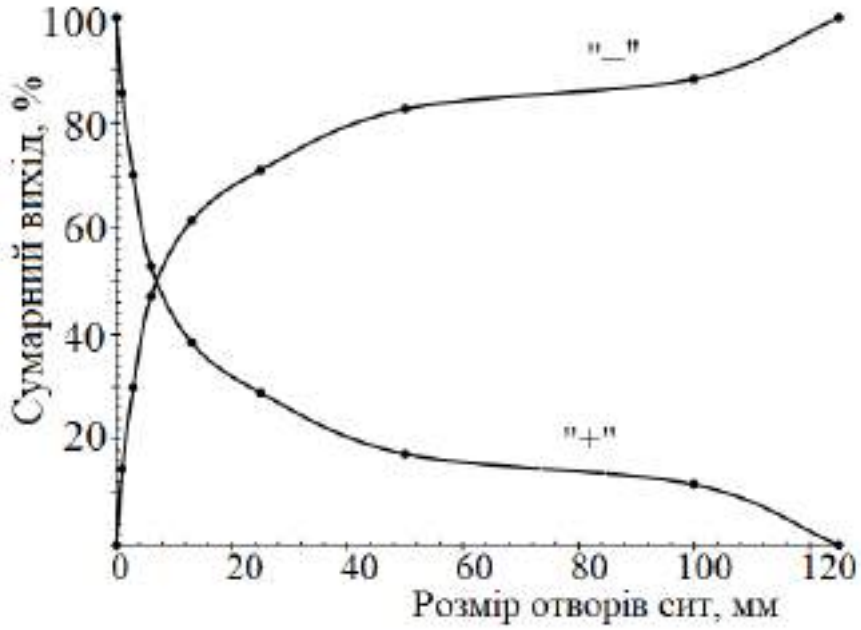


Рис. 4.2. Сумарні характеристики крупності матеріалу

Сумарні характеристики крупності (рис. 4.3) бувають: опуклими, прямолінійними та увігнутими. За характером кривої можна робити висновки про крупність матеріалу. Якщо крива має прямолінійний характер, значить матеріал характеризується рівномірним розподілом зерен усіх розмірів. При переважанні в матеріалі великих зерен крива має опуклий характер, а при переважанні дрібних зерен − увігнутий характер.

Користуючись кривою сумарної характеристики можна визначити вихід класу будь-якої крупності. Для цього з точки, що лежить на осі абсцис і відповідає певному розміру отвору

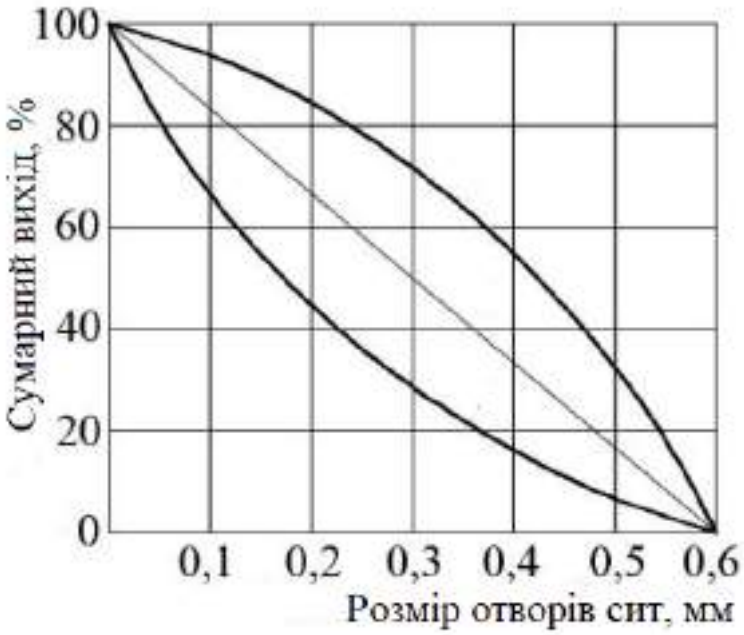


Рис. 4.3. Криві сумарних характеристик крупності матеріалу

сита, відновлюють перпендикуляр до перетину з кривою і через отриману точку перетину проводять пряму, паралельну осі абсцис до перетину з віссю ординат. Точка перетину відповідає виходу (у %) класу (+).

Таким чином, використовуючи графічне зображення результатів ситового аналізу, можна визначити проміжні значення виходів класів крупності вихідного матеріалу, а також порівняти результати кількох ситових аналізів, визначити ефективність роботи дробильного та подрібнювального обладнання.

Такі характеристики можна будувати лише за вузького діапазону крупності зерен матеріалу, тобто при невеликій кількості класів матеріалу. При більш повному аналізі крупності, що включає і результати седиментаційного аналізу, побудова таких кривих утруднено через те, що графік по осі абсцис виходить або дуже розтягнутим або лінії в області тонких класів зливатимуться. У цьому випадку результати аналізу крупності зображують у системі з напівлогарифмічними або логарифмічними шкалами. При напівлогарифмічній сітці по осі абсцис відкладаються логарифми розмірів отворів сита, а по осі ординат – сумарний вихід класів. При побудові логарифмічної

кривої по осі ординат відкладаються логарифми сумарних виходів класів, а осі абсцис – логарифми розмірів сит.

Практична частина

У таблиці 1 наведено вихід окремих фракцій і сумарний вихід, що розрахований по «+», тобто за сумарним залишком матеріалу на ситах, починаючи з найбільших. На рис. 4 наведено графічну характеристику крупності матеріалу, що побудована за даними таблиці 1. При цьому точкам на кривій відповідають за віссю абсцис нижні значення розміру отворів сит класу крупності в мм.

З експериментальних даних (табл. 4.1) розрахувати сумарний вихід по «−». Побудувати графічну характеристику крупності матеріалу по «−».

Таблиця 4.1

Результати ситового аналізу

Розмір отворів сит		Вихід		Сумарний вихід по «+», %	Сумарний вихід по «−», %
мм	меш	г	%		
−0,59+0,42	−23+35	15	7,32	7,32	100
−0,42+0,3	−35+48	13	6,34	13,66	92,68
−0,3+0,21	−48+65	21	10,25	23,91	86,34
−0,21+0,15	−65+100	17	8,29	32,20	76,09
−0,15+0,1	−100+150	35	17,07	49,27	67,80
−0,1+0,074	−150+200	41	20,0	69,27	50,73
−0,074+0	−200+0	63	30,73	100,00	30,73
Вихідний продукт	–	205	100,0	–	–

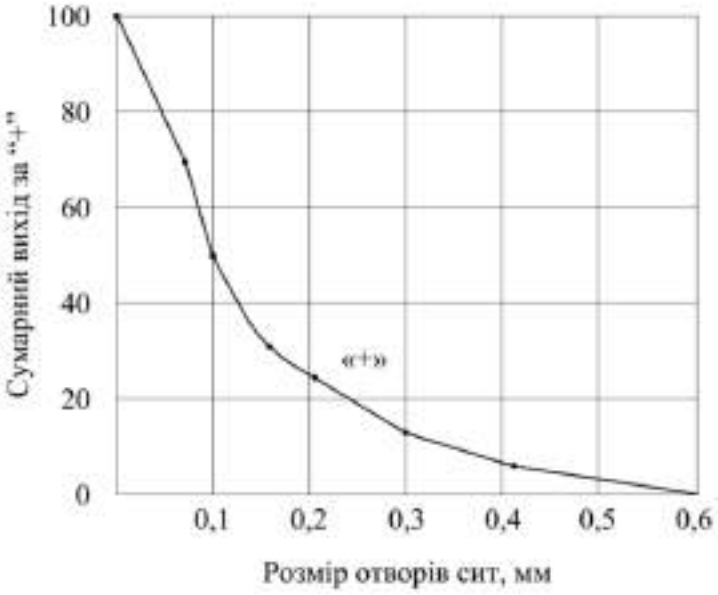


Рис. 4.4. Сумарна характеристика крупності матеріалу по «+» за даними таблиці 4.1

Розв'язання: Сумарні виходи по «−» розраховують шляхом послідовного додавання отриманих окремих виходів класів крупності, при цьому по мінусу підсумовування ведуть знизу вгору (табл. 4.2). Маючи значення розмірів отворів сит та сумарні виходи по плюсу та мінусу, будують сумарні характеристики крупності матеріалу (рис. 4.5). Точкам на кривій по «−» відповідають за віссю абсцис верхні значення розміру отворів сит класу крупності в мм.

Таблиця 4.2

Результати ситового аналізу, що доповнені розрахунком за «−»

Розмір отворів сит		Вихід		Сумарний вихід по «+», %
мм	меш	г	%	
−0,59+0,42	−23+35	15	7,32	7,32
−0,42+0,3	−35+48	13	6,34	13,66
−0,3+0,21	−48+65	21	10,25	23,91
−0,21+0,15	−65+100	17	8,29	32,20
−0,15+0,1	−100+150	35	17,07	49,27
−0,1+0,074	−150+200	41	20,0	69,27
−0,074+0	−200+0	63	30,73	100,00
Вихідний продукт	–	205	100,0	–

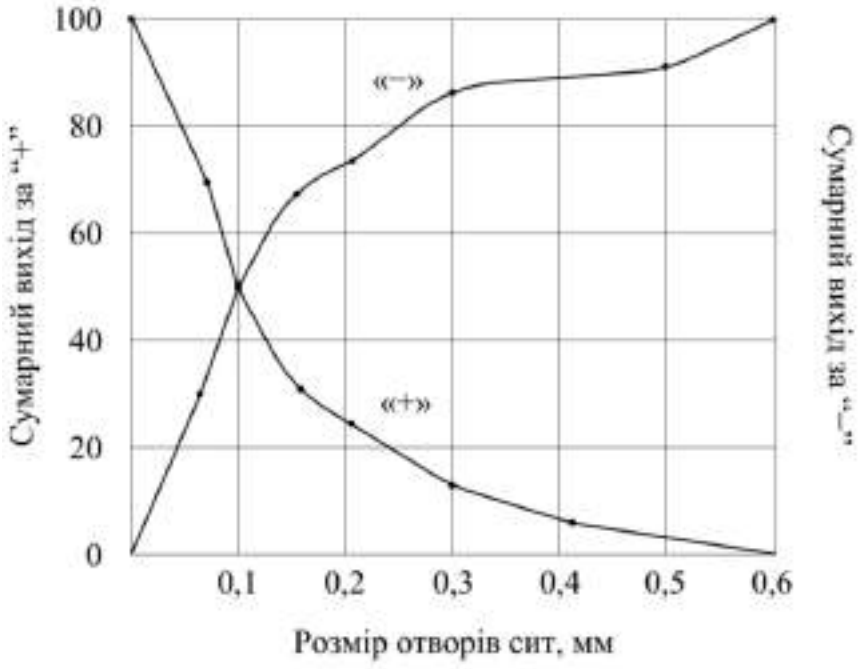


Рис. 4.5. Сумарні характеристики крупності матеріалу по «+» і по «−»

Завдання для самоконтролю

1. З якою метою визначають гранулометричний склад матеріалів?
2. Які методи аналізу використовують визначення гранулометричного складу?
3. Охарактеризуйте системи стандартних сит, що використовуються під час ситового аналізу.
4. Які продукти виходять у результаті класифікації?
5. Як проводиться оцінка ефективності просіювання?
6. Як графічно відображають дані ситового аналізу?
7. За наданими експериментальними даними ситового аналізу рохрахувати вихід окремих фракцій, сумарні виходи по «+» і по «−», побудувати графічні характеристики крупності матеріалу по «+» і по «−».

Клас, мм	Маса залишку на ситі після розсівання, г
−0,59+0,42	13,1
−0,42+0,3	12,0
−0,3+0,21	10,8
−0,21+0,15	7,0
−0,15+0,1	3,6
−0,1+0,074	2,5
−0,074+0	1,7

5. СЕДИМЕНТАЦІЙНИЙ АНАЛІЗ

Теоретична частина

5.1. Основи седиментаційного аналізу

Седиментаційний метод аналізу є окремим випадком дисперсійного аналізу, який полягає у тому, що у досліджуваної системі визначається швидкість осадження (седиментації) частинок під впливом сили тяжкості. Метою дисперсійного аналізу є отримання кривих розподілу, аналіз яких дозволяє встановити, який відносний вміст частинок у заданих інтервалах радіусів, тобто який фракційний склад системи. Залежно від відмінності в щільності дисперсної фази та дисперсійного середовища, рух частинок буде спрямований вниз або вгору. У суспензіях зазвичай щільність дисперсної фази вище, тому частинки осідають на дно судини. Для систем із відносно низьким ступенем дисперсності седиментаційний аналіз проводять у гравітаційному полі.

В основі седиментаційного аналізу лежить закон Стокса, згідно з яким визначається сила в'язкого опору середовища f, що протидіє осадженню частинок. Для частинки кулястої форми з радіусом r опір середовища дорівнює

$$f = Bv = 6\pi\eta rv \qquad (5.1)$$

де η – в'язкість дисперсійного середовища;

v – швидкість руху частинки;

$B = 6\pi\eta r$ – коефіцієнт опору руху частинки.

Осадження частинки кулястої форми з радіусом r у гравітаційному полі відбувається під дією сили тяжіння P

$$P = \frac{4}{3}\pi r^3(\rho-\rho_0)g \qquad (5.2)$$

де r – радіус сферичної частинки;

ρ – щільність дисперсної фази;

ρ_o – щільність дисперсійного середовища;

g – прискорення вільного падіння.

Спочатку під дією постійної сили P частинка рухається рівноприскорено, оскільки сила P більша за силу f. Принаймні збільшення швидкості зростає сила в'язкого опору середовища f. На деякий час ці сили порівнюються, і з цього моменту частинка буде рухатися з постійною швидкістю v. Прирівнюючи ці вирази

$$\frac{4}{3}\pi r^3(\rho-\rho_0)g = 6\pi\eta rv, \qquad (5.3)$$

можна встановити залежність між швидкістю осадження частинки та її радіусом

$$r = \sqrt{\frac{9\eta v}{2(\rho-\rho_0)g}} = k\sqrt{v}, \qquad (5.4)$$

де k – константа Стокса, постійна для цих умов

$$k = \sqrt{\frac{9\eta}{2(\rho-\rho_0)g}}. \qquad (5.5)$$

Седиментаційний аналіз дисперсних систем заснований на рівнянні (5.4), яке дозволяє визначити розміри частинок дисперсної фази за швидкістю їх осадження під дією сили тяжіння. Рівняння (5.4) застосовують для певних розмірів частинок з радіусами $r = 10^{-7}$–10^{-4} м, оскільки для осадження частинок такого розміру застосовується закон Стокса. У дисперсних системах з більшими частинками починається турбулізація рідини через прискорений рух частинок, і рівняння Стокса стає непридатним.

Слід зазначити, що рівняння (5.4) справедливе за умови сферичної форми частинок та їх незалежного руху друг від друга. Тому для седиментаційного аналізу застосовують сильно розведені системи, у яких можна знехтувати зміною швидкості руху частинок внаслідок їх зіткнення. У більшості реальних систем частинки мають неправильну форму. У цьому випадку за рівнянням (5.4) розраховують так званий еквівалентний радіус, тобто радіус частинок сферичної форми, що осідають з такою самою швидкістю.

5.2. Криві седиментації

За отриманими експериментальними даними будують криву седиментації – залежність ваги седиментаційного осаду *P* від часу осідання τ (рис. 5.1).

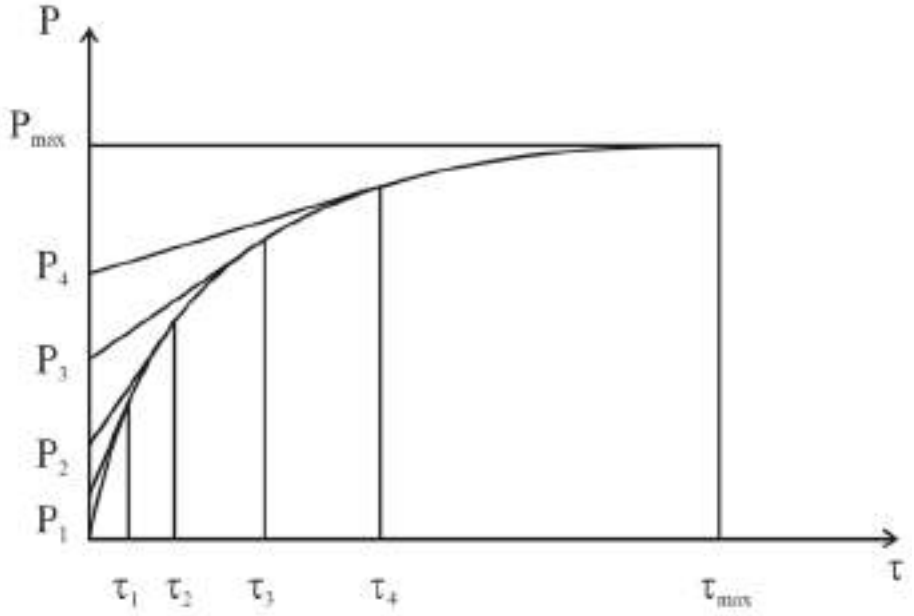


Рис. 5.1. Крива седиментації

Кут нахилу прямий характеризує швидкість накопичення осаду $\Delta P/\Delta\tau$ = const. Швидкість седиментації при осадженні частинки з деякою висоти за час τ можна виразити як

$$v = H/\tau, \qquad (5.6)$$

тоді радіус частинок визначають за формулою

$$r = k\sqrt{v} = k\sqrt{\frac{H}{\tau}}, \qquad (5.7),$$

де *H* – висота стовпа суспензії,

τ – час повного осадження частинок,

k – константа Стокса.

У реальних полідисперсних системах криві осідання мають плавний хід та наближаються до параболи. Отриману седиментаційну криву обробляють графічним способом, тобто шляхом побудови дотичних у точках кривої, що відповідають різним значенням часу осідання (рис. 5.1). Подовжують дотичні

до перетину з віссю одинат. Відрізки ординат відповідають вазі окремих фракцій частинок суспензії. Останній відрізок ординати між останньою дотичною та горизонтальною прямою відповідає P_{max}, що дорівнює вазі найбільш високодисперсної фракції суспензії. Значення P_{max} виходить тоді, коли седиментаційний аналіз доведено до кінця, тобто коли осіли частинки найменших розмірів.

Час τ_1 визначають за графіком (рис. 5.1) шляхом проведення дотичної до седиментаційної кривої, яка проходить через початок координат. Дотична повинна збігтися з початковою прямолінійною її ділянкою. З точки відриву дотичної від кривої (точка P_1) опускають перпендикуляр на вісь абсцис і знаходятьчас τ_1.

При великому відрізку часу осадження крива осадження суспензії полідисперсної сусупензії також переходить в пряму. Точка переходу τ_{max} відповідає закінченню процесу осадження всіх частинок суспензії. Проводячи дотичну до седиментаційної кривої, паралельну осі абсцис, з точки P_{max} опускають перпендикуляр і знаходять на осі абсцис час τ_{max}, яким розраховують r_{min} – радіус найдрібніших частинок.

До будь-якого довільного моменту часу τ_i повністю випадають частинки з $r \geq r_i$. Вагу цих частинок можна визначити як відрізок, що відсікається на осі ординат дотичною до кривої осадження в точці τ_i (рис. 5.1). Відношення OP_1/P_{max} відповідає відносному (за масою) вмісту суспензії частинок, розміри яких обмежені радіусами r_1 і r_{max}. Аналогічно відношення OP_2/P_{max} показує відносний вміст суспензії частинок з радіусами від r_2 до $r_{\max}$, а відношення OP_3/P_{max} − відносний вміст частинок з радіусом від r_3 до $r_{\max}$ і т. д. Весь розрахунок заснований на незалежності вкладу фракцій в загальну масу осаду.

Якщо сумарна кількість порошку в системі прийняти за 100%, то величини

$$Q_1 = OP_1/P_{max} \cdot 100\%;$$

$$Q_2 = OP_2/P_{max} \cdot 100\%;$$

$$Q_3 = OP_3/P_{max} \cdot 100\%$$

і так далі будуть процентним вмістом фракцій з радіусами відповідно $r \geq r_1$, $r \geq r_2$, $r \geq r_3$ і т. д. Вони відповідають масовим часткам фракцій та ними характеризують гранулометричний склад дисперсної системи.

Результати седиментаційного аналізу представляють у вигляді функцій, що відображають розподіл частинок за розмірами у системі. Зазвичай будують інтегральну та диференціальну криві розподіли. *Інтегральна крива* − це залежність від радіусу сумарної кількості частинок у % з розмірами від r до r_{max} або від r до r_{min}. Загальний вигляд таких кривих представлений на рис. 5.2.

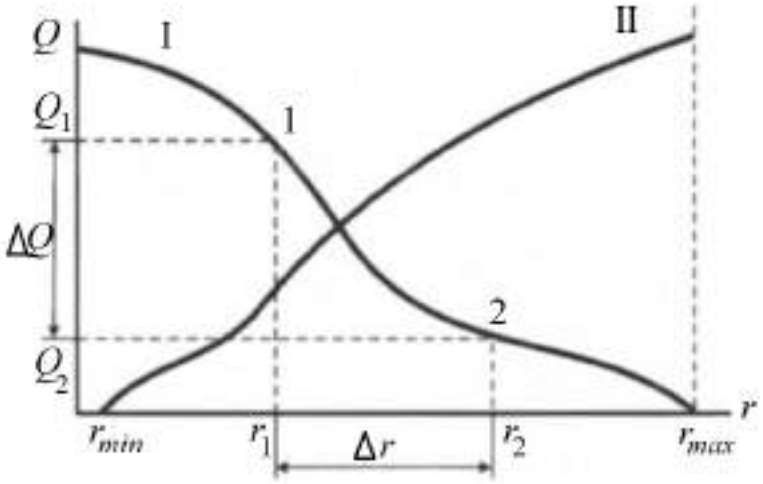


Рис. 5.2. Інтегральні криві розподілу частинок за розмірами

Ордината кожної точки кривої I дає відсотковий вміст частинок з даними та більшими радіусами, ніж відповідний на осі абсцис. Інтегральну криву розподілу можна побудувати і таким чином, щоб її ординати відповідали відсотковому вмісту частинок з радіусами і меншими (крива II). Важливою властивістю інтегральної кривої розподілу є можливість швидкого визначення в даної суспензії будь-якої фракції частинок. Якщо потрібно, наприклад, знайти кількість частинок, що мають розміри в межах від r_1 до r_2, то інтегральної кривої відзначають дві точки 1 і 2 з абсцисами r_1 іr_2. Різниця їх ординат $(Q_1 - Q_2) = \Delta Q$ прямо дає відсотковий вміст цієї фракції (рис. 5.2).

Наочніше уявлення про розподіл частинок у системі за розмірами дає диференціальна крива розподілу. *Диференціальна*

крива – це залежність функції розподілу $\Delta Q/\Delta r$ від радіусу частинок. Функція показує у % масу частинок, радіус яких лежить поблизу даного значення радіуса $r_{сер}$. Так, якщо вміст частинок в інтервалі радіусів від r_1 до r_2 становить ΔQ (рис. 5.3), то функція розподілу для середнього радіусу $r = (r_1 + r_2)/2$ становить $\Delta Q/(r_2 - r_1) = \Delta Q/\Delta r$. На графіку відкладають значення dQ/dr від r (рис. 5.3). Крива обмежена значеннями r_{min} і r_{max}. Диференціальна крива зазвичай має один максимум, що відповідає найбільш ймовірному розміру частинок $r_н$ у цій системі. Вона характеризує ймовірність розподілу по масі частинок різних радіусів, і чим вище її максимум, тим ближча суспензія до монодисперсної (крива 1). Зі збільшенням полідисперності у системі максимум знижується, і крива стає більш розтягнутою (крива 2).

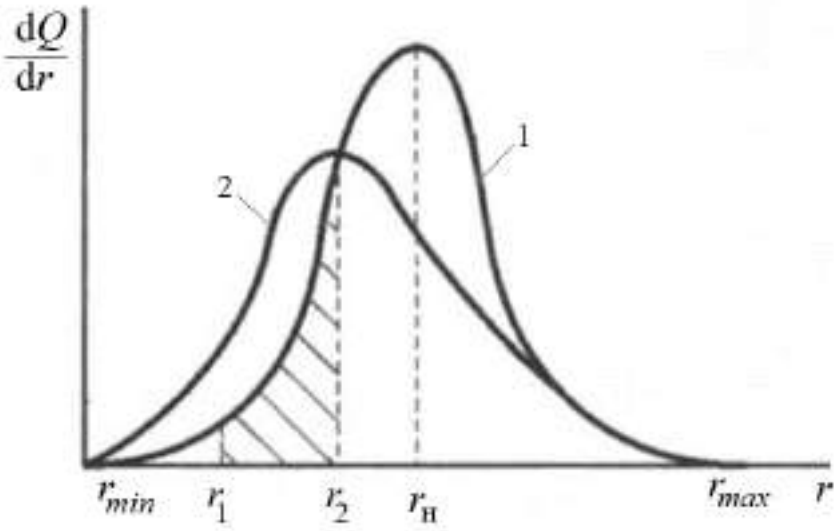


Рис. 5.3. Диференціальні криві розподілу частинок за розмірами

Відсотковий вміст фракції з розмірами від r_1 до r_2, тобто ймовірність знаходження суспензії частинок з цими розмірами, характеризується площею відповідної ділянки під кривою.

Практична частина

5.3. Методика проведення експерименту

Використовують метод безперервного зважування седиментаційного осаду за допомогою торсіонних ваг (рис. 5.4).

Для отримання кривої осадження суспензії визначають зміну ваги чашки торсіонних ваг, що поміщена в суспензію, у міру накопичення на ній осаду.

Підготовка ваг та визначення висоти стовпа рідини. Спочатку в циліндр наливають воду і занурюють чашку ваг. Встановлюють ваги на нуль. Далі вимірюють глибину занурення чашки ваг, тобто висоту стовпа рідини *H* над чашкою до рівня води в циліндрі. Прибирають чашку з циліндру.

Рис. 5.4. Торсійні ваги типу ВТ

Приготування суспензії проводять у циліндрі. Наважку сухого порошку скла поміщають у воду і ретельно перемішують протягом 2−3 хв скляною мішалкою вертикальними рухами, домагаючись рівномірного розподілу частинок суспензії по всьому об'єму.

Проведення вимірювань ваги осаду. Прибравши мішалку, швидко вносять у суспензію вимірювальну чашку і підвішують її до петлі коромисла ваг. Простежити, щоб на чашці не було бульбашок повітря і щоб чашка і нитка не торкалися стінок циліндра. Одночасно з зануренням чашки включають секундомір і встановлюють аретир ваг в положення «Відкрито».

Через задані інтервали часу вимірюють вагу частинок суспензії, що осіли на чашку. Вимірювання проводять з повного припинення осідання частинок. Ознакою цього є отримання трьох однакових значень маси поспіль. Швидкість процесу седиментації полідисперсної суспензії буває найбільшою на початку досліду. Тому на початку вимірювання проводять через кожні 20 с; у міру наближення до кінця досліду час між вимірами поступово збільшують до 10−15 хв. Дослід вважається закінченим, коли за 20 хв на чашці осідає 1−2 мг, що зазвичай відбувається через 2 години. Дані заносять до таблиці 5.1.

Таблиця 5.1

Експериментальні дані для побудови кривої седиментації

Інтервал часу, с	Вага частинок, що осіли на чашці *P*, мг
19	26
49	43
101	60
129	67
175	73
196	79
230	85
185	91
358	96
402	98
439	103
476	104
496	105
524	16
557	107
620	113
672	115
745	118
813	119
955	125
1141	130
1283	131
1499	136
1801	140
2116	143
2443	146
2747	148
3295	153
3931	154
5115	154
5417	154

5.4. Обробка експериментальних даних

Побудова та обробка кривої осадження частинок суспензії. Будують седиментаційну криву в координатах «$P_{осаду}$ – час» (рис. 5.5). Точки графіка з'єднують плавною лінією, що виходить з початку координат.

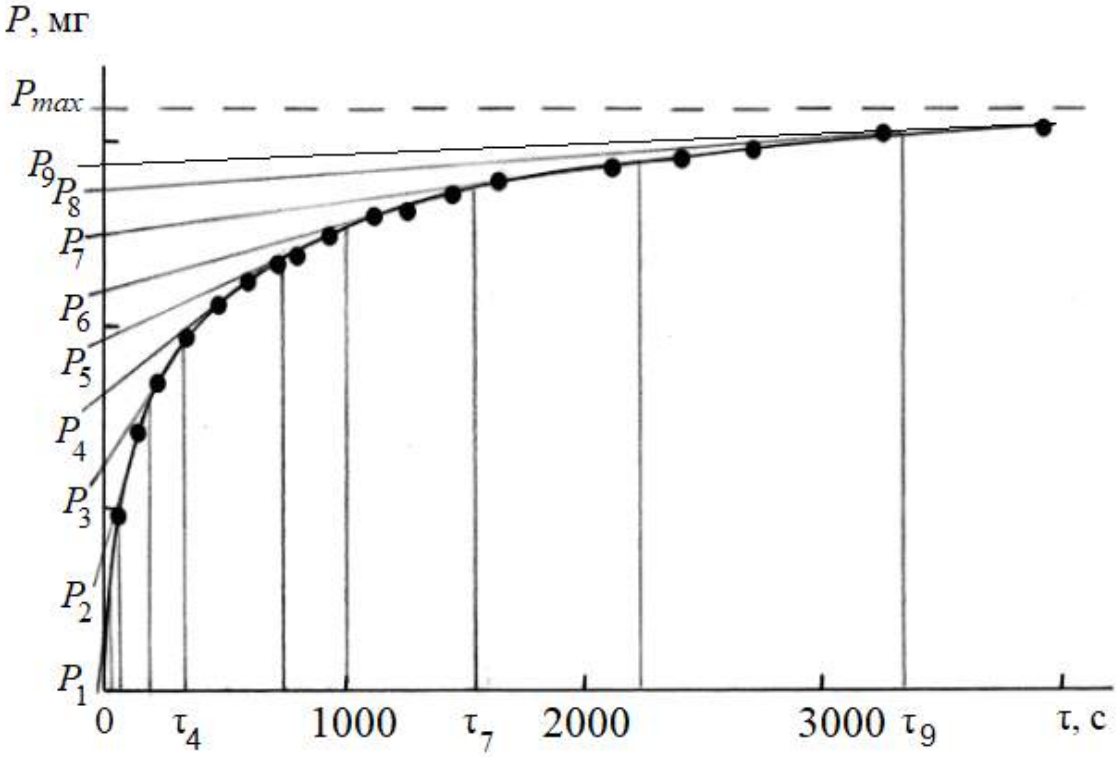


Рис. 5.5. Седиментаційна крива

Визначення процентного вмісту окремих фракцій суспензії. З отриманої седиментаційної кривої розраховують відсоткове співвідношення окремих фракцій частинок суспензії. Для цього вибирають кілька точок (7−10) на кривій і проводять дотичні до кожної точки. Кожна дотична до кривої седиментації відсікає на осі ординат відрізок, що дорівнює вазі частинок, що повністю осіли на даний момент часу. Тоді як ординати, проведені з точок дотику, відсікають на осі абсцис відрізки, що відповідають часу повного осідання різних фракцій. Для кожного часу осідання розраховують еквівалентний радіус частинок за формулою

$$r = \sqrt{\frac{9\eta H}{2(\rho - \rho_0) g \tau}},$$

де: H − висота стовпа рідини над чашкою, 12,2 см;

η − в'язкість води, 0,01 пз;

ρ_0 − щільність води, 1 г/см^3;

ρ − щільність скла, 2,5 г/см^3;

g – прискорення вільного падіння, 981 см/с^2.

Тоді радіус частинок скла в мікронах визначають за такими формулами

$$k = 10^4 \sqrt{\frac{9\eta}{2(\rho - \rho_0)g}} = 10^4 \sqrt{\frac{9 \cdot 0{,}01}{2 \cdot (2{,}5 - 1) \cdot 981}} = 55{,}3,$$

$$r = 55{,}3\sqrt{\frac{H}{\tau}}.$$

5.5. Побудова інтегральних та диференціальних кривих розподілу частинок за розмірами

Побудова інтегральної кривої розподілу частинок за розмірами. Вимірюють довжини відрізків ординати між дотичними (в мм) і виражають їх у відсотках від загальної довжини ординати (в експерименті – 159 мм). Відрізок ординати від початку координат до точки перетину першої дотичної P_1, віднесений до 159, дає відсотковий вміст частинок в інтервалі між максимальним еквівалентним радіусом (у даному випадку – 40 мкм) та найбільшим, визначеним за седиментаційною кривою (35,9 мкм). З величин окремих відрізків між дотичними (рис. 5.5) обчислюють відсотковий вміст частинок фракцій між відповідними еквівалентними радіусами. Відрізок від межі седиментації до найближчої до нього дотичної P_9 виражає відносний вміст частинок менше визначеного із седиментаційної кривої еквівалентного радіусу (3,3 мкм). Отримані дані записують у таблицю 5.2.

З даних таблиці будують інтегральну криву розподілу (рис. 5.6). По осі ординат відкладають сумарний процентний вміст фракцій Q, починаючи з найдрібніших частинок; по осі абсцис − радіуси частинок, що відповідають більшому значенню радіусу даної фракції. Наприклад, якщо в досліджуваному порошку найбільш дрібна фракція містить частинки з еквівалентними

Таблиця 5. 2

Розрахункові дані для побудови інтегральної кривої розподілу частинок за розмірами

Час осідання частинок τ,с	Радіус частинок *r*, мкм	Інтервали розмірів частинок окремих фракцій, мкм	Довжина відрізків між дотичними, мм	Вміст фракцій в системі, %
3343	3,3	< 3,3	21	13,2
2243	4,1	3,3−4,1	13	8,2
1529	4,9	4,1−4,9	16	10,1
1014	6,1	4,9−6,1	13	8,2
743	7,1	6,1−7,1	15	9,4
329	10,6	7,1−10,6	19	11,9
186	14,2	10,6−14,2	25	15,7
57	25,6	14,2−25,6	19	11,9
29	35,9	25,6−35,9	10	6,3
		35,0−40,0	8	5,1
Усього			159	100

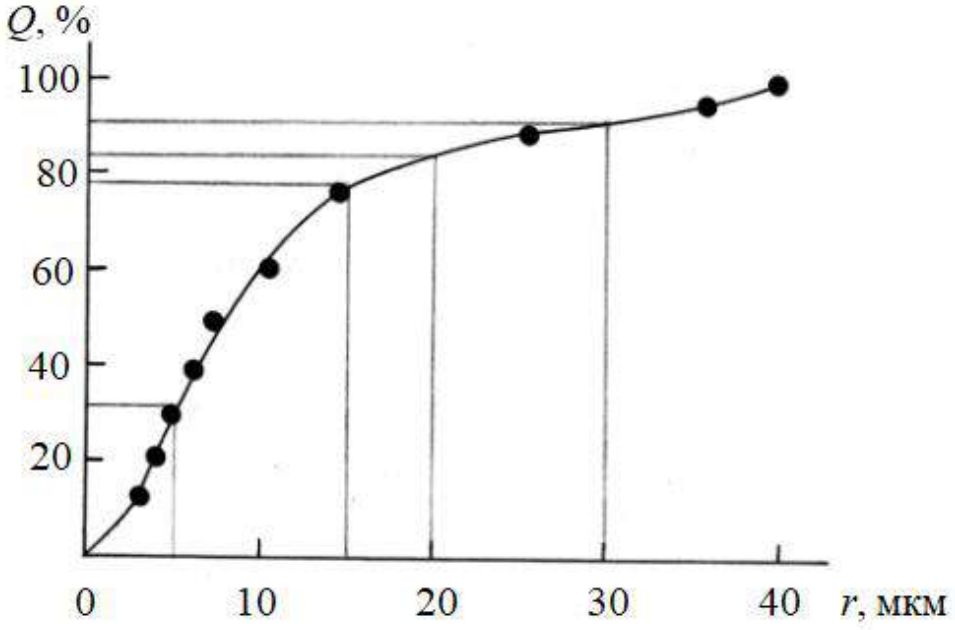


Рис. 5.6. Інтегральна крива розподілу частинок за розмірами

радіусами < 3,3 мкм і відносна кількість її в дисперсній системі 13,2%, то на осі ординат відкладають 13,2%, а по осі абсцис 3,3 мкм. Наступна фракція знаходиться в межах 3,3–4,1 мкм та відносна її кількість 8,2%, тоді по осі абсцис відкладають величину 4,1 мкм, а по осі ординат відкладають сумарний відсотковий вміст обох фракцій, тобто 13,2% + 8,2% = 21,4%.

Будь-яка точка інтегральної кривої показує відсотковий вміст у системі частинок з меншими еквівалентними радіусами, ніж відповідний по осі абсцис.

Побудова диференціальної кривої розподілу частинок за розмірами. При переході від інтегральної до диференціальної кривої розподілу вісь абсцис на рис. 5.6 розбивають на рівні інтервали радіусів (зазвичай цей інтервал 2–5 мкм) і знаходять величини збільшення процентного вмісту частинок $\Delta Q/\Delta r$ для кожного інтервалу. Знайдені величини вносять у таблицю 5.3.

Таблиця 5.3

Розрахункові дані для побудови кривої диференціальної розподілу частинок за розмірами

r, мкм	Q, %	ΔQ, %	$\Delta Q/\Delta r$
5	33	33	6,6
10	59	26	5,2
15	78	19	3,8
20	84	6	1,2
25	89	5	1,0
30	92	3	0,6
35	95	3	0,6
40	100	5	1,0

За даними таблиці 5.3 будують диференціальну криву розподілу (рис. 5.7), відкладаючи по осі ординат $\Delta Q/\Delta r$, а по осі абсцис радіуси. Наприклад, $\Delta Q/\Delta r$ в інтервалі радіусів від 0 до 5 мкм дорівнює 6.6. Графічно це показано на рис. 5.7 першим прямокутником. Другий прямокутник будують в інтервалі радіусів від 5 до 10 мкм і до максимального радіусу частинок. З'єднавши середини прямокутників, отримують плавну криву з одним максимумом, що відповідає найбільш ймовірному розміру частинок основної фракції. Слід зазначити, що форма отриманої диференціальної кривої, залежно від характеру

дисперсності системи, що досліджується, може бути різною; наприклад, у полідисперсної системи цілком може бути диференціальна крива з двома максимумами.

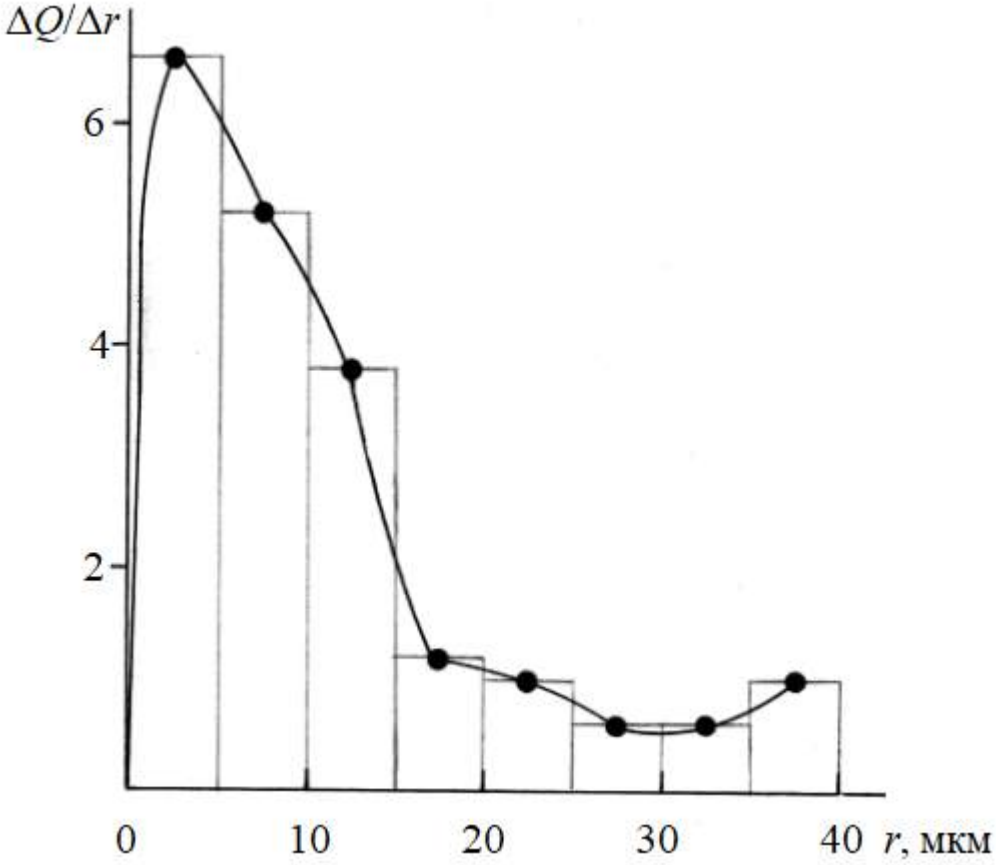


Рис. 5.7. Диференціальна крива розподілу частинок за розмірами

За диференціальною кривою визначають найбільш ймовірний радіус $r_н$, а також r_{min}, r_{max} і ступінь полідисперсності П, як відношення максимального радіуса до мінімального

$$П = r_{max}/r_{min}. \quad (5.8)$$

Завдання для самоконтролю

1. Для яких дисперсних систем застосовується седиментаційний аналіз у гравітаційному полі?

2. Напишіть рівняння Стокса для швидкості седиментаційного аналізу у гравітаційному полі. Поясніть фізичний зміст величин, що входять до нього. Якими параметрами системи можна змінювати швидкість осадження

частинок?

3. Напишіть вираз константи для седиментації сферичних частинок, якщо їх осадження підпорядковується закону Стокса.

4. Який порядок розрахунку радіусів частинок?

5. Які системи називаються монодисперсними, які полідисперсними? Що є характеристикою полідисперсності системи?

6. Що характеризують інтегральні та диференціальні криві розподілу частинок за розмірами? Як змінюватиметься вид кривих розподілу у міру наближення полідисперсної системи до монодисперсної?

7. Як щодо інтегральної та диференціальної кривих розподілу визначити відсотковий склад фракції частинок з радіусами від $r1$ до r_2?

8. За наданими експериментальними даними побудувати седиментаційну криву осідання суспензії купрум(II) оксиду у гептадекані, інтегральну і диференціальну криві розподілу частинок за розмірами, оцінити фракційний склад системи і ступінь полідисперсності.

Час осідання, хв	Вага частинок, що осіли на чашці *P*, мг
0,5	111,2
1	115,6
2	118,4
3	119,3
5	120.1
7,5	121,4
10	122,5
15	123,4
25	124,7
30	125,7
40	126,4
50	127,1
70	127,2
90	127,2

Додаткові дані для розрахунку: H − висота стовпа рідини над чашкою, 15,8 см; η − в'язкість гептадекану, 0,03737 пз; ρ_0 − щільність гептадекану, 0,777 г/см^3; ρ − щільність CuO 6,31 г/см^3; g – прискорення вільного падіння, 981 см/с^2.

6. ОЦІНКА ПРОМИСЛОВИХ ВІДХОДІВ ЯК СИРОВИНИ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА В'ЯЖУЧИХ РЕЧОВИН

Теоретична частина

6.1. Трикомпонентна діаграма для визначення складу сумішей

Вибір з відходів готових сировинних сумішей (шихт) для виробництва будматеріалів шляхом зіставлення хімічних складів відходів та сировинних сумішей, що використовуються при виробництві традиційних будматеріалів, основан на використанні трикомпонентних діаграм (рис. 6.1). При попаданні фігуративної точки, що характеризує склад відходу, в область певного будівельного матеріалу відхід можна вважати сировинною сумішшю даного виду будівельних матеріалів.

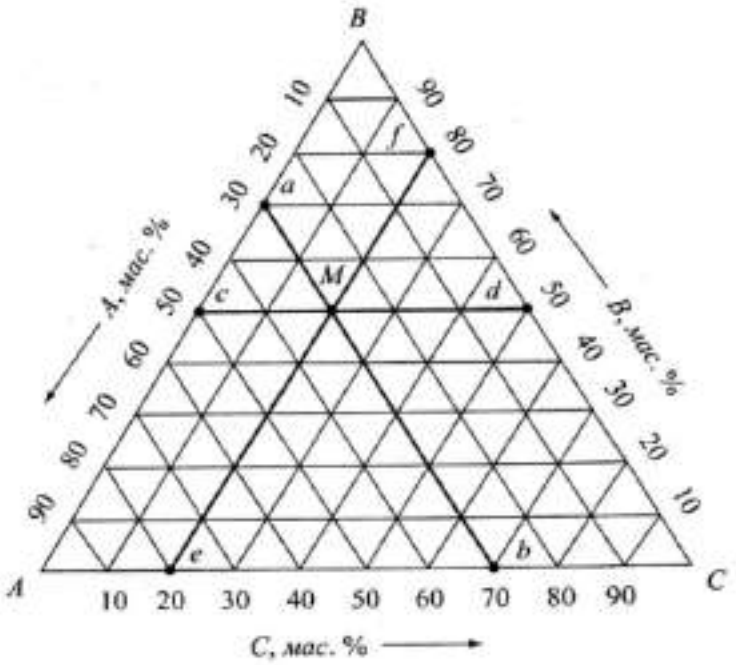


Рис. 6.1 Трикомпонентна діаграма

Якщо відхід за складом не відповідає певним будматеріалам, його розглядають як компонент сировинних сумішей, а випуск будівельних матеріалів на його основі

можливий тільки при роботі на штучних гомогенізованих шихтах.

Використання діаграм трикомпонентних систем (рис. 6.1) ґрунтується на наступних принципах. Якщо точка лежить усередині трикутника концентрацій (*M*), то для визначення вмісту компонента *A* потрібно через *M* провести лінію паралельну стороні трикутника (*BC*), протилежної стосовно вершини *A* (*a–b*). Ця пряма відсіче на двох сторонах (*AC* і *AB*) рівні відрізки (*aB* і *bC*), які і виражають вміст компонента А (тут 30%). Аналогічно визначаються із вмістом В і *C*.

Можна визначити вміст всіх трьох компонентів одразу на будь-якій стороні трикутника (наприклад, *AC*). Для цього з точки *M* проводять відрізки, паралельні двом іншим сторонам *AB* та *BC*. Ці відрізки при перетині зі стороною *AC* дають 2 точки *e* і *b*, які розбивають бік *AC* на три відрізки, довжини яких визначають вміст всіх трьох компонентів: *Ae–C*, *eb–B*, *bC–A*.

6.2. Марочність вторинної сировини для виробництва гіпсів

Додатковою сировиною для виробництва гіпсових в'яжучих матеріалів можуть служити гіпсовмісні відходи хімічної промисловості, що утворюються при хімічній переробці апатитових фосфоритових концентратів, при виробництві екстракційної фосфатної кислоти, боратної кислоти, бури та суперфосфату. Вони є побічними продуктами, що містять гіпсовий компонент – фосфогіпс, борогіпс та ін.

Якість гіпсовміщуючих відходів визначається як хімічним складом, даними з мінералогії і гранулометрії, так і показниками марочності сировини. Хімічний показник марочності сировини $K_М$ запропонований для прогнозування міцності одержуваних гіпсових в'яжучих. Цей показник дозволяє зрештою управляти технологією отримання в'яжучих з фосфогіпсу. Марочність сировини тим вища, що ближче $K_М$ до одиниці:

$$K_М = \frac{[(CaO + SO_3) - \Sigma\text{оксиди домішок}]}{(CaO + SO_3)}. \qquad (6.1)$$

6.3. Оцінка гідравлічних властивостей гранульованих шлаків кольорової металургії

Оцінка гідравлічних властивостей гранульованих шлаків кольорової металургії проводиться за допомогою критерію якості $K_Я$, який визначають за формулою:

$$K_Я = \frac{CaO + MgO + Al_2O_3 + Fe_2O_3 + 0,5FeO}{SiO_2 + 0,5FeO}. \qquad (6.2)$$

Залежно від критерію якості та хімічного складу шлаки кольорової металургії поділяються на сорти, наведені у таблиці 6.1.

Таблиця 6.1

Технічні вимоги до гранульованих шлаків кольорової металургії

Показники	Норми для сорту		
	I	II	III
Критерій якості	>1	0,7–1,0	<0,7
Масова частка, %			
SiO_2	26–32	33–52	33–52
CaO + MgO, не менше	20	17	8
FeO, не більше	30	30	35

6.4. Оцінка кислотно-основних властивостей доменних шлаків

Склад і фізичні властивості доменних шлаків залежать від виду використовуваної сировини, якості палива, що спалюється, і сорту чавуну. Хімічний склад доменних шлаків досить складний, у яких зустрічається до 30 різних хімічних елементів, вплив яких на властивості шлаку залежить від кількості оксиду у продукті. Переважаючими оксидами в доменних шлаках є SiO_2, Al_2O_3, CaO, MgO, MnO, FeO та SO_3. За кислотністю доменні шлаки поділяються на кислі (з переважанням SiO_2 і Al_2O_3), основні (з переважанням CaO та MgO) та нейтральні (з вмістом приблизно рівної кількості кислотних та основних оксидів), що оцінюється модулем основності M_O:

• основні шлаки

$$M_{\text{О}} = \frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3} > 1; \qquad (6.3)$$

• кислі шлаки

$$M_{\text{О}} = \frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2} < 1; \qquad (6.4)$$

• проміжні шлаки

$$M_{\text{О}} = \frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3} < 1; \qquad (6.5)$$

$$M_{\text{О}} = \frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2} > 1. \qquad (6.6)$$

П. І. Боженовим запропоновано використовувати як хімічну характеристику силікатів емпіричний коефіцієнт основності:

$$K_{\text{осн}} = \frac{(\text{CaO} + 0,93\text{MgO} + 0,6\text{R}_2\text{O}) - (0,55\text{Al}_2\text{O}_3 + 0,35\text{Fe}_2\text{O}_3 + 0,7\text{SO}_3)}{0,93\text{SiO}_2} \qquad (6.7),$$

де чисельник показує кількість умовно вільного CaO, необхідного для утворення кальцій силікатів, а знаменник – кількість CaO для зв'язування SiO_2 в кальцій моносиликат.

Відповідно до величини $K_{\text{осн}}$, всі попутні продукти можна розділити на п'ять груп:

• ультраосновні ($K_{\text{осн}} > 2$);
• основні ($K_{\text{осн}} = 1,2–2$);
• нейтральні ($K_{\text{осн}} = 0,8–1,2$);
• кислі ($K_{\text{осн}} = 0–0,8$);
• ультракислі ($K_{\text{осн}} = 0$).

Сировина з $K_{\text{осн}} > 1$ має самостійні в'яжучі властивості, які можуть бути посилені, якщо ввести активатори або якщо твердіння здійснюють в умовах автоклавної обробки.

При $K_{\text{осн}} < 1$ в сировині переважають кислотні оксиди, і її використовують у вигляді «механічно активної сировини» або її

склад коригують введенням добавок, що містять CaO, з метою підвищення $K_{осн}$ і посилення в'яжучих властивостей.

6.5. Оцінка гідравлічних властивостей доменних гранульованих шлаків

Оцінка гідравлічних властивостей доменних гранульованих шлаків проводиться за допомогою коефіцієнта якості $K_Я$, що визначається за такими формулами:

• при вмісті MgO до 10%

$$K_Я = \frac{CaO + MgO + Al_2O_3}{SiO_2 + TiO_2}; \quad (6.8)$$

• при вмісті MgO більше 10%

$$K_Я = \frac{CaO + 10 + Al_2O_3}{SiO_2 + TiO_2 + (MgO - 10)}. \quad (6.9)$$

Залежно від коефіцієнта якості та хімічного складу доменні гранульовані шлаки поділяються на три сорти (таблиця 6.2).

Таблиця 6.2

Хімічний склад і $K_Я$ в залежності від сорту шлака

Показники	Показники для сортів		
	I	II	III
$K_Я$, не менше	1,65	1,45	1,2
Al_2O_3, % не менше	8,0	7,5	не норму-ється
MgO, % не більше	15,0	15,0	15,0
TiO_2, % не більше	4,0	4,0	4,0
MnO, % не більше	2,9	3,0	4,0

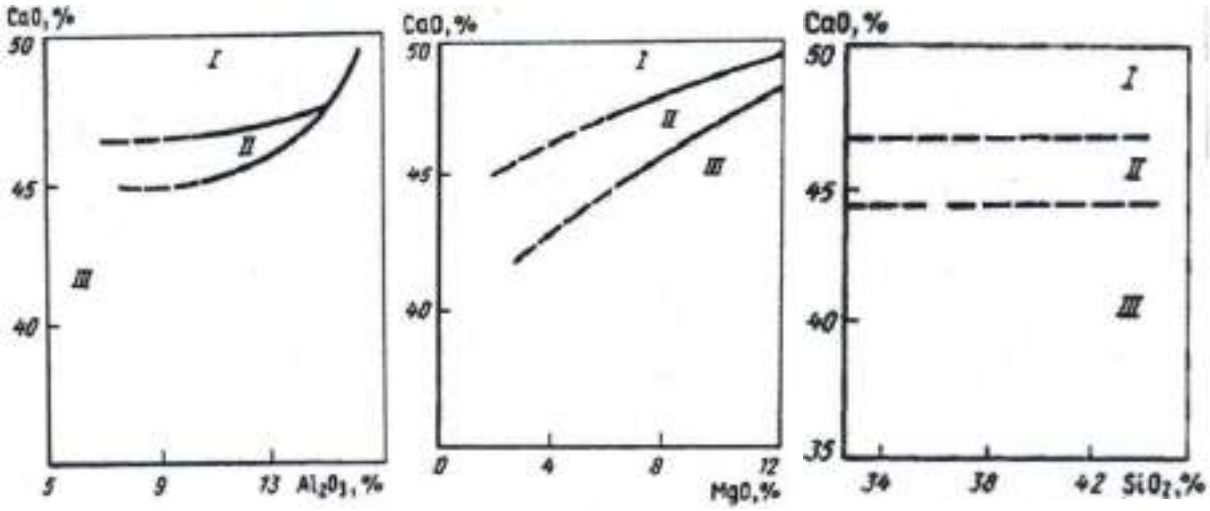
6.6. Хімічні критерії силікатного розпаду доменних шлаків

Силікатний розпад обумовлений наявністю C_2S у доменному шлаку. Двокальцієвий силікат $2CaO{\cdot}SiO_2$ – сполука, що має складний поліморфізм. Сполука існує у чотирьох поліморфних формах. β-форма при звичайному тиску не має температурної області стабільного існування, тобто метастабільна (нижче 675 °С). Розпад шлаку відбувається при переході C_2S з β-форми у γ-форму зі збільшенням об'єму приблизно на 12%. Це призводить до саморозсипання спечених препаратів з утворенням доменного борошна.

У портландцементі синтезується саме β-$2CaO{\cdot}SiO_2$, що має гідравлічну активність, тому необхідно запобігати силікатному розпаду. γ-форма не твердіє.

Шлаки, що пролежали у відвалах і не розпалися, вважаються стійкими. Існують різні хімічні та структурні критерії оцінки стійкості шлаків до силікатного розпаду.

Діаграми Хартмана і Ланге (рис. 6.2) достатньо характеризують стійкість доменних шлаків різних складів і можуть бути використані для аналізу їх схильності до силікатного розпаду.



а б в

Рис. 6.2 Діаграми Хартмана і Ланге – області існування доменних шлаків, що повністю розпадаються (I), схильних до розпаду (II) та стабільних (III) залежно від вмісту: а – Al_2O_3; б – MgO; в – SiO_2

Як видно із рис. 6.2а, б до силікатного розпаду схильні шлаки з підвищеним вмістом CaO (46–49%). Збільшення концентрації оксидів Алюмінію і Магнію в шлаках зрушує їх в область стійких. Шлаки з вмістом 40–42% CaO та з більш високими концентраціями алюмінію (до 10–15%) та магнію (до 8–12%) розташовані в області стійких станів.

На діаграмі в координатах $CaO–SiO_2$ (рис. 6.2в) нанесені склади доменних шлаків. Це дозволило виявити межі вмісту CaO, що характеризують області розпаду та стійкості. При 44,5–47,0% CaO шлаки схильні до розпаду, при <44,5% CaO стійкі і за >47,0% CaO повністю розпадаються. При вмісті 34–44% SiO_2 ці дані справедливі для шлаків із різними концентраціями Al_2O_3 та MgO.

Перевірка схильності до розпаду проводиться за величиною $CaO_{кр}$:

$$CaO_{кр}=0{,}92SiO_2 + Al_2O_3 + 0{,}2MgO; \qquad (6.10)$$

$$CaO_{кр} = 1{,}2SiO_2 + 0{,}4Al_2O_3 – 0{,}8MgO + 1{,}75S. \qquad (6.11)$$

Якщо $CaO<CaO_{кр}$, то шлак є стійким до силікатного розпаду.

Якщо $CaO>CaO_{кр}$, то проводять мікроскопічні дослідження. Шлаки, що розпадаються, повинні мати кристали неправильної форми з паралельними штрихами або штрихами, що перетинаються. Це вказує на наявність β-C_2S. Критичний розмір зерен β-форми, стабільний за нормальної температури, дорівнює 5 мкм. Тому шлаки, що містять дрібнокристалічний β-C_2S, схильні до фізичної стабілізації і не розпадаються.

6.7. Гідравлічна активність золошлакових відходів

Гідравлічна активність золошлакових відходів оцінюється за модулем активності $M_а$:

$$M_а = \frac{Al_2O_3}{SiO_2}. \qquad (6.12)$$

Щоб визначити основні властивості золошлакових відходів з метою з'ясування придатності як сировини для виробництва в'яжучих речовин, рекомендується дати оцінку за «модулем основності» M_o:

$$M_O = \frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3}. \qquad (6.13)$$

Загальні коливання M_O = 0,06–1,5.

З підвищенням M_O і M_a гідравлічна активність шлаків та зол зростає.

Класифікація паливних шлаків та зол залежно від вмісту CaO (4 групи):

1. висококальцієві (CaO > 45%);
2. середньокальцієві (CaO = 20–45%);
3. низькокальцієві (CaO = 10–20%);
4. надкислі (CaO < 10%).

Практична частина

6.8. Використання трикомпонентної діаграми для визначення складу сумішей

1. Визначте склад трикомпонентної системи, який на діаграмі (рис. 6.3) відповідає точка *n*.

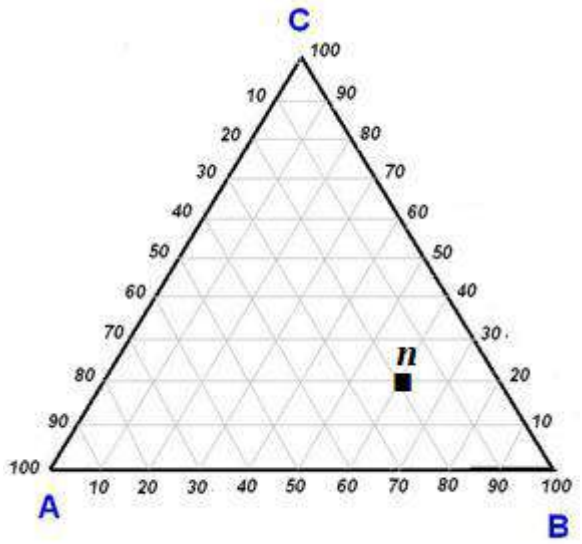


Рис. 6.3 Трикомпонентна діаграма з фігуративною точкою *n*

Розв'язання:

Перший варіант.

Вміст компоненту *A*: Для визначення вмісту компонента *A* потрібно через *n* провести лінію паралельну стороні трикутника (*BC*), що протилежна до вершини *A* (*b–c*) (рис. 6.4). Ця пряма відсіче на двох сторонах (*AC* і *AB*) рівні відрізки (*bC* і *cB*), які і виражають вміст компонента *A* (тут 20%).

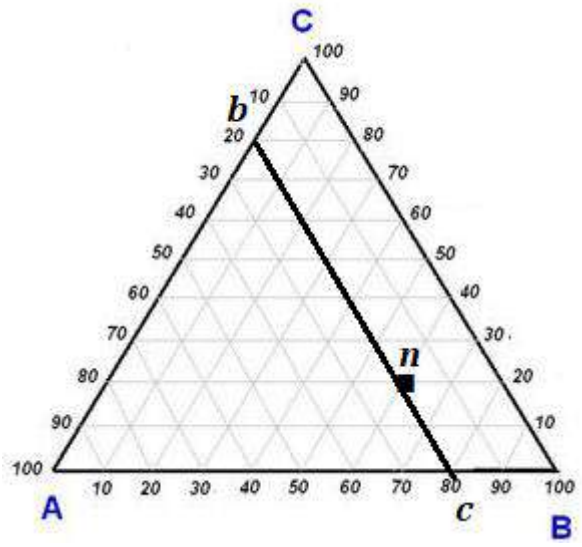


Рис. 6.4 Визначення вмісту компоненту *A*

Вміст компоненту *B*: Пряма *de*, паралельна стороні трикутника *AC*, відсікає на сторонах трикутника *CB* та *AB* відрізки *dC* та *eA*, що відображають вміст компонента *B*, а саме 60% (рис. 6.5).

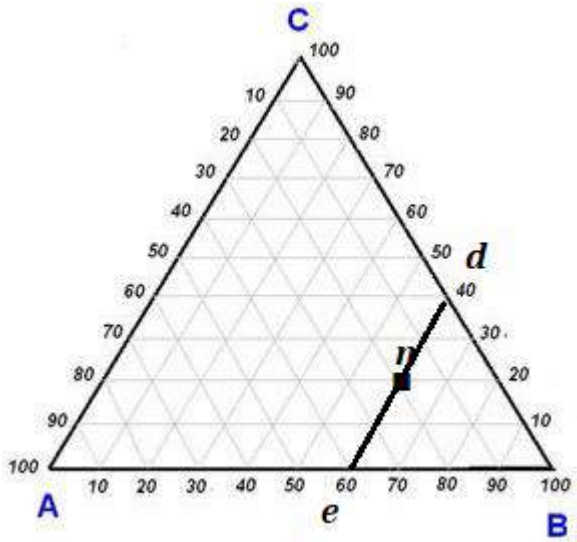


Рис. 6.5 Визначення вмісту компоненту *B*

Вміст компоненту *C*: Пряма *fg*, паралельна стороні трикутника *AB*, відсікає на сторонах трикутника *AC* та *CB* відрізки *fA* та *gB*, що відображають вміст компонента *C*, а саме 20% (рис. 6.6).

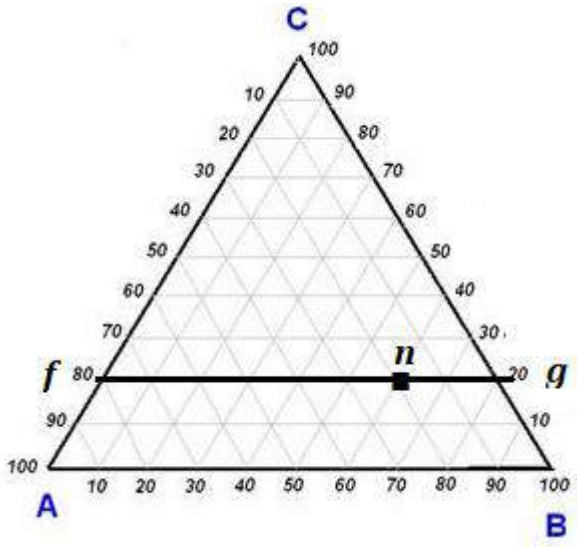


Рис. 6.6 Визначення вмісту компоненту *C*

Таким чином, склад суміші наступний, %: *A* – 20; *B* – 60; *C* – 20.

Другий варіант. Можна визначити вміст всіх трьох компонентів одразу на будь-якій стороні трикутника (наприклад, *AB*) (рис. 6.7). Для цього з точки *n* проводять відрізки, паралельні двом іншим сторонам *AC* та *BC*. Ці відрізки при

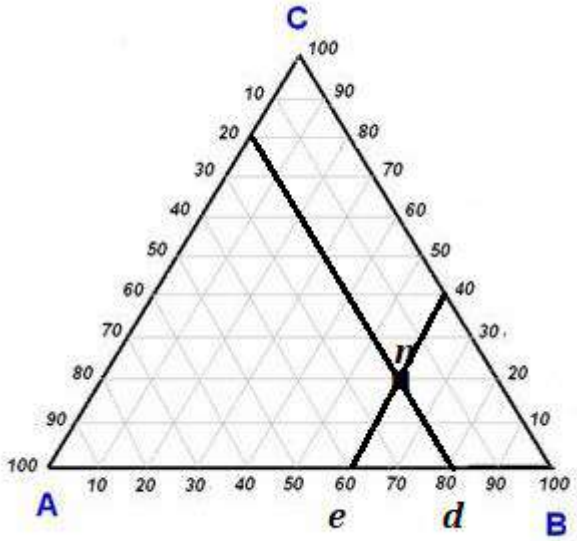


Рис. 6.7 Визначення вмісту трьох компонентів одночасно

перетині зі стороною *AB* дають 2 точки *e* і *d*, які розбивають бік *AB* на три відрізки, довжини яких і визначають вміст усіх трьох компонентів: *Ae* – *B* (60%), *ed* – *C* (20%), *dB* – *A* (20%).

Відповідь: Склад суміші наступний, %: *A* – 20; *B* – 60; *C* – 20.

6.9. Визначення марочності вторинної сировини для виробництва гіпсів

2. Визначте коефіцієнти марочності фосфогіпсів як сировини для виробництва гіпсу за складами, представленими в таблиці 6.3.

Таблиця 6.3

Склади фосфогіпсів

Сировина	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	R_2O	РЗЕ	SiO_2	SO_3	P_2O_5	F
Фосфогіпс 1	0,7	0,76	31,75	0,14	0,13	0,92	0,72	45,02	1,47	0,22
Фосфогіпс 2 (після промивки)	0,02	0,05	32,07	0,08	0,01	0,11	0,52	45,22	0,1	0,02

Розв'язання:

Розрахуємо $К_М$ для двох видів фосфогіпсу.

Фосфогіпс 1:

$$K_{\text{M}} = \frac{[(\text{CaO} + \text{SO}_3) - \Sigma\text{оксиди домішок}]}{(\text{CaO} + \text{SO}_3)} =$$

$$= \frac{(31,75 + 45,02) - (0,7 + 0,76 + 0,14 + 0,13 + 0,92 + 0,72 + 1,47 + 0,22)}{31,75 + 45,02} =$$

$$= \frac{76,77 - 5,06}{76,77} = 0,934;$$

Фосфогіпс 2:

$$K_{\text{M}} = \frac{(32,07 + 45,22) - (0,02 + 0,05 + 0,08 + 0,01 + 0,11 + 0,52 + 0,1 + 0,02)}{32,07 + 45,22} =$$

$$= \frac{77,29 - 0,91}{77,29} = 0,988;$$

Відповідь: Для фосфогіпсу № 1 $К_М$=0,934, для фосфогіпсу № 2 − $К_М$=0,988. Після промивки частина оксидів домішок розчинилася, марочність фосфогіпсу збільшилася.

6.10. Кількісна оцінка гідравлічних властивостей гранульованих шлаків кольорової металургії

3. Оцініть гідравлічні властивості і сортність мідеплавильного гранульованого шлаку зі складом, %: SiO_2 – 35,3; Al_2O_3 – 6,3; FeO – 47,7; CaO – 6,6; MgO – 0,9; SO_3 – 2,5; інше – 0,7.

Розв'язання: Оцінка гідравлічних властивостей гранульованих шлаків кольорової металургії проводиться за допомогою критерію якості $К_Я$, який визначають за формулою (6.2). Розрахуємо критерій якості:

$$К_Я = \frac{CaO + MgO + Al_2O_3 + Fe_2O_3 + 0,5FeO}{SiO_2 + 0,5FeO} =$$

$$= \frac{6,6 + 0,9 + 6,3 + 0,5 \cdot 47,7}{35,3 + 0,5 \cdot 47,7} = \frac{37,65}{59,15} = 0,637.$$

Величина $К_Я$<0,7 свідчить про належність мідеплавильного гранульованого шлаку до III сорту (таблиця 6.1).

За масовим вкладом оксидів, представлених у таблиці 6.1, мідеплавильний гранульований шлак відноситься до сортів, а саме: SiO_2 – 35,3% (II сорт); (CaO + MgO) – 7,5% (III сорт); FeO – 47,7% (не відповідає сортам).

Відповідь: Для мідеплавильного гранульованого шлаку $К_Я$=0,637. Шлак можна віднести до 3 сорту, тому що два з показників відповідають цьому сорту. Певну настороженість викликає підвищений вміст FeO. Даний шлак не можна використовувати в технічних процесах, де неприпустимо високий вміст заліза.

6.11. Кількісна оцінка кислотно-основних властивостей доменних шлаків

4. Оцініть кислотно-основні властивості доменних шлаків, склад яких наведено у таблиці 6.4.

Таблиця 6.4

Оксидний склад доменних шлаків

Шлак доменний	SiO_2	SO_3	Al_2O_3	CaO	MgO	R_2O	FeO
№ 1	31,95	2,7	11,61	40,70	3,56	0,38	8,29
№ 2	36,25	4,12	10,62	45,12	1,21	0,24	5,17

Розв'язання: Кислотно-основні властивості доменних шлаків можна оцініти за величиною M_O:

– розрахунок M_O за формулою (6.3):

• шлак доменний № 1

$$M_O = \frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3} = \frac{40,7 + 3,56}{31,95 + 11,61} = \frac{44,26}{43,55} = 1,02 > 1;$$

• шлак доменний № 2

$$M_O = \frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3} = \frac{45,12 + 1,21}{36,25 + 10,62} = \frac{46,33}{46,87} = 0,99 < 1;$$

– розрахунок M_O за формулою (6.4):

• шлак доменний № 1

$$M_O = \frac{CaO + MgO + Al_2O_3}{SiO_2} = \frac{40,7 + 3,56 + 11,61}{31,95} = \frac{55,87}{31,95} = 1,75 > 1;$$

• шлак доменний № 2

$$M_O = \frac{CaO + MgO + Al_2O_3}{SiO_2} = \frac{45,12 + 1,21 + 10,62}{36,25} = \frac{56,95}{36,25} = 1,57 > 1;$$

– розрахунок $K_{осн}$ за формулою (6.7)

• шлак доменний № 1

$$K_{осн} = \frac{(CaO + 0,93MgO + 0,6R_2O) - (0,55Al_2O_3 + 0,35Fe_2O_3 + 0,7SO_3)}{0,93SiO_2} =$$

$$= \frac{(40,7 + 0,93 \cdot 3,56 + 0,6 \cdot 0,38) - (0,55 \cdot 11,61 + 0,7 \cdot 2,7)}{0,93 \cdot 31,95} = \frac{35,96}{29,71} = 1,21 > 1;$$

• шлак доменний № 2

$$K_{осн} = \frac{(CaO + 0,93MgO + 0,6R_2O) - (0,55Al_2O_3 + 0,35Fe_2O_3 + 0,7SO_3)}{0,93SiO_2} =$$

$$= \frac{(45,12 + 0,93 \cdot 1,21 + 0,6 \cdot 0,24) - (0,55 \cdot 10,62 + 0,7 \cdot 4,12)}{0,93 \cdot 36,25} = \frac{37,66}{33,71} = 1,12 > 1;$$

Результати розрахунку M_O за формулами (6.3) і (6.4) і $K_{осн}$ за формулою (6.7) представлені у таблиці 6.5.

Таблиця 6.5

Результати розрахунку модулів основності та емпіричного коефіцієнту основності для доменних шлаків

Шлак доменний	M_o за формулами		$K_{осн}$
	(3.3)	(3.4)	(3.7)
№ 1	1,02>1	1,75>1	1,21>1
№ 2	0,99<1	1,57>1	1,12>1

Відповідь: Шлак доменний № 1 відноситься до нейтрального за показником M_O (формула (6.3)), за іншими показниками – до основного. Шлак доменний № 2 за M_O відноситься до проміжної груп шлаків і за величиною $K_{осн}$ відноситься до нейтрального шлаку. Величина $K_{осн} > 1$ свідчить про наявність самостійних в'яжучих властивостей двох шлаків.

5. Оцініть кислотно-основні властивості доменного шлаку, мінеральний склад якого наведено у таблиці 6.6.

Таблиця 6.6

Мінеральний склад гранулометричної фракції >10 мм гранульованого доменного шлаку «АрселорМітал Кривій Ріг»

Мінерал	Масова частка мінералів, %
Кальцит $CaCO_3$	5,3
Геленіт $Ca_2Al_2O_7$	55,9
Окерманіт $Ca_2MgSi_2O_7$	9,5
Ранкініт $Ca_3Si_2O_7$	28,9
Ольдгаміт CaS	0,40

Розв'язання:

а) Представимо кожен мінерал у вигляді суми оксидів: кальцит $CaCO_3$ – $CaO{\cdot}CO_2$; геленіт $Ca_2Al_2SiO_7$ – $2CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}SiO_2$; окерманіт $Ca_2MgSi_2O_7$ – $2CaO{\cdot}MgO{\cdot}2SiO_2$; ранкініт $Ca_3Si_2O_7$ – $3CaO{\cdot}2SiO_2$.

б) Розрахуємо оксидний склад кожного мінералу, використовуючи молярну масу мінералу та оксиду. Наприклад, масова частка оксидів CaO, Al_2O_3 і SiO_2 в геленіті дорівнює:

$$N_{CaO} = \frac{2M_{CaO}}{M_{2CaO\cdot Al_2O_3\cdot SiO_2}} = \frac{112}{274} = 0,409;$$

$$N_{Al_2O_3} = \frac{M_{Al_2O_3}}{M_{2CaO\cdot Al_2O_3\cdot SiO_2}} = \frac{102}{274} = 0,372;$$

$$N_{SiO_2} = \frac{M_{SiO_2}}{M_{2CaO\cdot Al_2O_3\cdot SiO_2}} = \frac{60}{274} = 0,219.$$

Результати розрахунку наведено в таблиці 6.7.

в) Розрахуємо оксидний склад фракції доменного шлаку з урахуванням масового вкладу кожного мінералу. Наприклад, для геленіту:

N_{CaO}= 0,409·0,559 =0,229;

$N_{Al_2O_3}$ =0,372·0,559 =0,208;

N_{SiO_2} =0,219·0,559 =0,122.

Таблиця 6.7

Оксидний склад мінералів доменного шлаку

Мінерал, молярна маса	Масова частка оксидів			
	CaO	MgO	Al_2O_3	SiO_2
Кальцит $CaO{\cdot}CO_2$; *M*=100 г/моль	0,56	–	–	–
Геленіт $2CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}SiO_2$; *M*=274 г/моль	0,409	–	0,372	0,219
Окерманіт $2CaO{\cdot}MgO{\cdot}2SiO_2$; *M*=272 г/моль	0,412	0,147	–	0,441
Ранкініт $3CaO{\cdot}2SiO_2$; *M*=288 г/моль	0,583	–	–	0,417

Результати розрахунку наведено в таблиці 6.8.

Таблиця 6.8

Оксидний склад фракції гранульованого доменного шлаку

Мінерал, молярна маса	Масова частка оксидів			
	CaO	MgO	Al_2O_3	SiO_2
Кальцит $CaO{\cdot}CO_2$	0,03	–	–	–
Геленіт $2CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}SiO_2$	0,229	–	0,208	0,122
Окерманіт $2CaO{\cdot}MgO{\cdot}2SiO_2$	0,039	0,014	–	0,042
Ранкініт $3CaO{\cdot}2SiO_2$	0,168	–	–	0,121
Усього	0,466	0,014	0,208	0,285

г) Розрахуємо показники кислотно-основних властивостей фракції доменного шлаку за формулами (6.3), (6.4) і (6.7). Результати розрахунку наведено в таблиці 6.9.

Таблиця 6.9

Результати розрахунку модулів основності та емпіричного коефіцієнту основності для фракції доменного шлаку

M_o за формулами		$K_{осн}$
(3.3)	(3.4)	(3.7)
0,97<1	2,41>1	1,38>1

Відповідь: За розрахованими показниками фракцію гранульованого доменного шлаку можна віднести до класифікаційної групи основних шлаків.

6.12. Кількісна оцінка гідравлічних властивостей доменних гранульованих шлаків

6. Оцініть гідравлічні властивості гранульованого доменного шлаку зі складом, %: SiO_2 – 36,3; Al_2O_3 – 16,6; (Fe_2O_3 + FeO) – 0,73; TiO_2 – 0,59; CaO – 31,4; MgO – 12,2; інше – 2,18.

Розв'язання: Оцінка гідравлічних властивостей доменних гранульованих шлаків проводиться за допомогою коефіцієнта якості $K_Я$, що визначається за формулою (6.8) при вмісті MgO до 10% і за формулою (6.9) при вмісті MgO більше 10%. Оскільки вміст MgO 12,2% >10%, то для розрахунку $K_Я$ необхідно використовувати формулу (6.9):

$$K_Я = \frac{CaO + 10 + Al_2O_3}{SiO_2 + TiO_2 + (MgO - 10)} = \frac{31,4 + 10 + 16,6}{36,3 + 0,59 + (12,2 - 10)} = \frac{58}{39,09} = 1,48.$$

По всіх показниках таблиці 6.2 шлак відноситься до II сорту.

Відповідь: За величиною $K_Я$ і вмістом оксидів Al_2O_3, MgO і TiO_2 шлак відноситься до II сорту.

6.13. Визначення критеріїв силікатного розпаду доменних шлаків

7. Оцініть стійкість доменного шлаку по відношенню до силікатного розпаду з використанням діаграм Хартмана і Ланге (рис. 3.2) і критерію $CaO_{кр}$, якщо оксидний склад шлаку наступний, %: CaO – 43; MgO – 7; Al_2O_3 – 11; SiO_2 – 37.

Рішення: Як видно із діаграм Хартмана і Ланге (рис. 6.8) робоча точка розтошована в області стабільних шлаків. З цього робимо висновок, що шлак несхильний до силікатного розпаду.

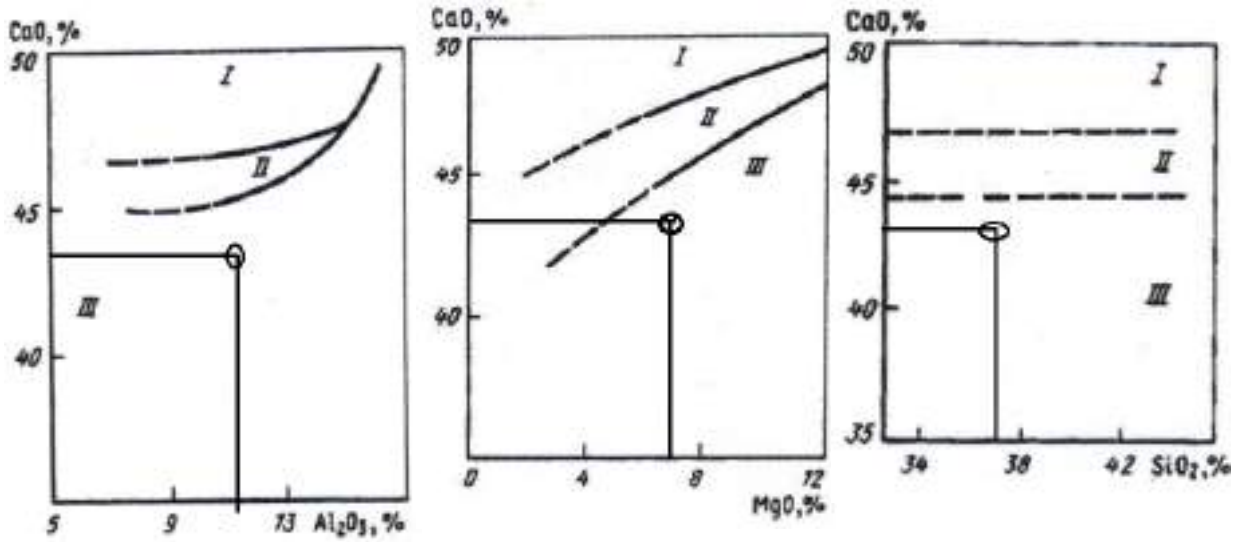
Перевірка схильності до розпаду також проводиться за величиною $CaO_{кр}$ за формулами (6.10) і (6.11). Для аналізованого шлаку $CaO_{кр}$ рівні:

− за формулою (6.10)

$$CaO_{кр}=0{,}92SiO_2 + A1_2O_3 + 0{,}2MgO = 0{,}9\cdot 37 + 11 + 0{,}2\cdot 7= 45{,}7;$$

− за формулою (6.11)

$$CaO_{кр} = 1{,}2SiO_2 + 0{,}4Al_2O_3 – 0{,}8MgO + 1{,}75S = 1{,}2\cdot 37 + 0{,}4\cdot 11 – \quad – 0{,}8\cdot 7 = 43{,}2.$$



а б в

Рис. 6.8 Діаграми Хартмана і Ланге для виявлення областей існування доменних шлаків, що повністю розпадаються (I), схильних до розпаду (II) та стабільних (III) залежно від вмісту: а – Al_2O_3; б – MgO; в – SiO_2

В обох розрахунках $CaO<CaO_{кр}$, що вказує на стабільність доменного шлаку по відношенню до силікатного розпаду.

Відповідь: За розтошуванням фігуративної точки в області стабільних шлаків і за відношенням $CaO<CaO_{кр}$ можна зробити висновок, що доменний шлак стабільний до силікатного розпаду.

6.14. Кількісна оцінка гідравлічної активності золошлакових відходів

8. Оцінити гідравлічну активність золи ТЕС із складом, %: SiO_2 – 39; Al_2O_3 – 9,5; (Fe_2O_3 + FeO) – 13,8; CaO – 21; MgO

– 13; інше – 3,7. Класифікувати цю золу залежно від вмісту CaO.

Розв'язання: Оцінимо гідравлічну активність золи ТЕС шляхом розрахунку $M_а$ та $M_О$ за формулами (6.12) і (6.13):

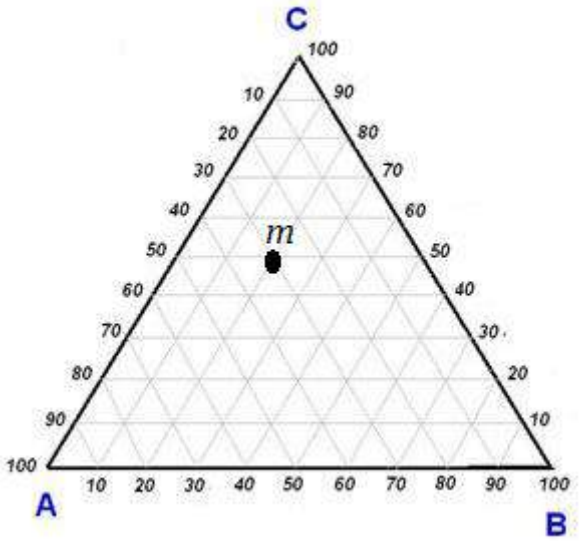
$$M_а = \frac{Al_2O_3}{SiO_2} = \frac{9,5}{39} = 0,24;$$

$$M_О = \frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3} = \frac{21+13}{39+9,5+13,8} = 0,55.$$

Відповідь: Зола ТЕС відноситься до кислої, зі середньою гідравлічною активністю. За класифікацією за вмістом CaO зола відноситься до середньокальцієвих.

Завдання для самоконтролю

1. Визначте склад трикомпонентної системи, який на діаграмі відповідає точка *m*.



2. Визначте коефіцієнти марочності фосфогіпсу як сировини для виробництва гіпсу за складами, представленими в таблиці

Сировина	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	R_2O	РЗЕ	SiO_2	SO_3	P_2O_5	F
Фосфогіпс	1,9	0,53	41,5	0,25	0,44	0,89	0,79	37,0	2,55	0,19

3. Оцініть кислотно-основні властивості і сортність мідеплавильного гранульованого шлаку зі складом, %: SiO_2 – 29,0; Al_2O_3 – 4,7; FeO – 43,6; CaO – 10,0; MgO – 3,1; SO_3 – 3,1; інше – 6,5.

4. Оцініть кислотно-основні властивості доменного шлаку, склад якого наступний, %: SiO_2 – 30,85; Al_2O_3 – 2,63; FeO – 4,12; CaO – 40,54; MgO – 4,83; SO_3 – 1,12; R_2O – 0,93; інше – 14,98.

5. Оцініть кислотно-основні властивості гранульованого доменного шлаку, мінеральний склад якого наведено у таблиці.

Таблиця

Мінеральний склад гранульованого доменного шлаку

Мінерал	Масова частка мінералів, %
Кальцит $CaCO_3$	6,2
Геленіт $Ca_2Al_2O_7$	40,36
Окерманіт $Ca_2MgSi_2O_7$	21,64
Ранкініт $Ca_3Si_2O_7$	29,4
Ольдгаміт CaS	2,40

6. Оцініть гідравлічні властивості гранульованого доменного шлаку зі складом, %: SiO_2 – 33,2; Al_2O_3 – 14,8; (Fe_2O_3 + FeO) – 3,9; TiO_2 – 2,9; CaO – 35,1; MgO – 10,1.

7. Оцініть стійкість доменного шлаку по відношенню до силікатного розпаду з використанням діаграм Хартмана і Ланге (рис. 6.2) и критерію $CaO_{кр}$, якщо оксидний склад шлаку наступний, %: CaO – 47; MgO – 8; Al_2O_3 – 10; SiO_2 – 38.

8. Оцінити гідравлічну активність золи ТЕС із складом, %: SiO_2 – 38,3; Al_2O_3 – 7,4; (Fe_2O_3 + FeO) – 15,3; CaO – 29; MgO – 10. Класифікувати цю золу за вмістом CaO.

7. СУЧАСНІ В'ЯЖУЧІ РЕЧОВИНИ НА ОСНОВІ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТУ

Теоретична частина

7.1. Портландцемент як гідравлічна в'яжуча речовина

Неорганічні в'яжучі речовини – це порошкоподібні матеріали, які утворюють при змішуванні з водою пластично-в'язку масу, яка з часом затвердіє у міцне каменеподібне тіло. Надалі ми будемо розглядати тільки неорганічні в'яжучі речовини. ля неорганічних в'яжучих речовин характерні наступні ознаки:

● гідрофільність;

● здатність утворювати з водою тістоподібну масу;

● здатність переходити у твердий стан без дії зовні. Іноді для прискорення твердіння цементні вироби підлягають тепловологій обробці.

За умовами твердіння та водостійкості продуктів неорганічні в'яжучі речовини діляться на повітряні і гідравлічні. До повітряних в'яжучих речовин відносять повітряне вапно, гіпсові в'яжучі. *Повітряні в'яжучі речовини* після змішування з водою твердіють на повітрі і продукти твердіння нестійкі по відношенню до води.

До гідравлічних в'яжучих речовин відносяться портландцемент, глиноземистий цемент, гідравлічне вапно. *Гідравлічні в'яжучі речовини* після первинного схоплювання на повітрі надалі можуть твердіти і під водою. Продукти твердіння зберігають міцність у воді.

Існує поняття *гідравлічна активність в'яжучих речовин* – це активність по відношенню до води. Чим менше розмір частинок, тим більше сумарна поверхня, вище поверхнева енергія і більше хімічна активність. Підвищення хімічної активності також спостерігається при збільшенні внутрішньої мікропористості речовини при порушенні правильної кристалічної структури, при використанні речовини в аморфному стані.

Основними гідравлічними в'яжучими є гідравлічне вапно, портландцемент, глиноземистий і високоглиноземистий цементи.

Портландцемент – це гідравлічна в'яжуча речовина, що отримується випаленням до спікання подрібненої суміші вапняку і глини, утворюючими клінкер і подальшим тонким подрібненням клінкеру з гіпсом або іншими спеціальними добавками.

Спікання – це часткове плавлення компонентів, при якому частинки зчіплюються між собою.

Розрізняють:

- портландцемент без добавок (з гіпсом);
- портландцемент з мінеральними добавками;
- шлакопортландцемент.

Гіпс у кількості ≈ 5% додають для уповільнення схоплювання. Клінкерний порошок без гіпсу при змішуванні з водою швидко схоплюється і твердіє в цементний камінь з низькими механічними властивостями.

Шлакопортландцемент отримують при введенні в клінкер доменних або інших шлаків до 20% від маси в'яжучого.

Сировинними матеріалами для виробництва портландцементного клінкеру служать

карбонати	і	*алюмосилікати*
3	:	1
природні породи і мінерали		*глини*
крейда, вапно (50% $CaCO_3$)		каолініт $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ (70% SiO_2 і 5–20 % Al_2O_3)

Основні операції виробництва портландцементу:

– підготовка сировинних матеріалів і приготування з них однорідної суміші;

– випалення до спікання;

– помел клінкеру в порошок з добавкою гіпсу та ін.

Основна операція – здобуття клінкеру із заданим фазовим складом, що визначається складом і якістю сировини, режимом випалення.

У хімії цементу прийнята *номенклатура по Тейлору* для скорочення написання мінералів цементного клінкеру. Основні

мінерали цементного клінкеру можна записати наступним чином:

CaO – C Al_2O_3 – A

SiO_2 – S Fe_2O_3 – F H_2O – H

Випалення сировинної суміші проводиться в шахтних або в сучасних печах, що обертаються. Піч має деякий нахил, тому суміш переміщається до нижнього кінця печі. Назустріч сировинній суміші протитечією йдуть гарячі гази, що утворюються при згоранні палива: природного газу, вугільного пилу. Із вихідних компонентів ($CaCO_3$ і $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$) утворюються мінерали цементного клінкера (таблиця 7.1).

Таблиця 7.1

Основні мінерали цементного клінкера, їх позначення і вміст у клінкері

Назва мінерала	Формула	Умовне позначення	Вміст в клінкері, %
Трьохкальцієвий силікат (аліт)	$3CaO \cdot SiO_2$	C_3S	45–60
двохкальцієвий силікат (беліт)	$2CaO \cdot SiO_2$	C_2S	20–30
Чотирикальцієвий алюмоферит (целіт)	$4\ CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	C_4AF	10–20
Трьохкальцієвий алюмінат	$3CaO \cdot Al_2O_3$	C_3A	3–12

7.2. Взаємодія цементного клінкеру з водою (водозачинення цементу)

При взаємодії цементного клінкеру з водою його компоненти утворюють практично нерозчинні у воді сполуки, інакше отверділі бетони не були б водостійкими. Сполуки гідратів утворюються в результаті часткового гідролізу і гідратації солей клінкеру, утворених сильною основою $Ca(OH)_2$ і слабкими кислотами H_2CO_3, H_2SiO_3.

Взаємодія з водою аліта C_3S приводить до утворення гідросилікатів Са різного складу залежно від температури середовища і концентрації кальцій гідроксиду в рідкій фазі. Протікають процеси гідратації і гідролізу:

$$C_3S + nH \rightarrow C_3SH_n,$$

$$3CaO \cdot SiO_2 + nH_2O \rightarrow 3CaO \cdot SiO_2 \cdot nH_2O \text{ (гідратація).}$$

Основні реакції взаємодії з водою аліта є сумісними реакціями гідролізу і гідратації:

$$C_3S + (n + 1)H \rightarrow C_2SH_n + Ca(OH)_2,$$

$$3CaO \cdot SiO_2 + (n + 1)H_2O \rightarrow 2CaO \cdot SiO_2\ nH_2O + Ca(OH)_2,$$

або

$$2C_3S + 6H \rightarrow C_3S_2H_3 + 3Ca(OH)_2,$$

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

Взаємодія з водою беліта C_2S є процесом гідратації:

$$C_2S + 2H \rightarrow C_2SH_2,$$
$$C_2S + nH \rightarrow C_2SH_n.$$

Взаємодія з водою C_3A є процесом гідратації. При великій кількості води утворюється сильно оводнений $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 10–12\ H_2O$:

$$C_3A + (10 - 12)H \rightarrow C_3AH_{10\text{-}12} \text{ (нест.).}$$

При використанні води в кількостях, зазвичай прийнятих в технології бетону утворюється гідрат $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O$. Усі інші гідроалюмінати поступово переходять у шестиводний алюмінат. Тому загальноприйнято наступне рівняння:

$$3CaO\ Al_2O_3 + 6H_2O \rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O.$$

По-іншому протікає процес в присутності гіпсу. Гіпс взаємодіє з гідроалюмінатами, які знаходяться у розчині та утворюють малорозчинний гідросульфоалюмінат кальцію – мінерал етрингіт:

$$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O + 3CaSO_4 + 25(26)H_2O \rightarrow$$

$$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 31(32)H_2O.$$

У цьому випадку уповільнюється схоплювання бетону. Протягом деякого періоду відбувається зв’язування

гідроалюмината кальцію. Тільки після того, як витрачено весь гіпс (1–3 години), починає виділятися чистий гідроалюмінат кальцію і цемент твердіє.

Взаємодія з водою целіта є складним процесом гідролізу і гідратації. C_4AF при взаємодії з водою гідролітично розщеплюється:

$$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3 + (m + 6)H_2O \rightarrow$$

$$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O + CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot mH_2O.$$

Утворюється шестиводний трьохкальцієвий алюмінат та гідроферит кальцію. Гідроферит Са взаємодіє з $Ca(OH)_2$ та утворює більш основний гідроферит $3(4)CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot nH_2O$:

$$CFH + 3Ca(OH)_2 + 10H \rightarrow C_4FH_{14}.$$

Гідроферити кальцію, подібно гідроалюмінатам, утворюють комплексну сполуку з гіпсом – гідросульфоферит $3CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot (30–32)H_2O$.

7.3. Алюмінатні цементи

Глиноземистий цемент – це швидкотвердіюче гідравлічне в’яжуче, яке складається з низькоосновних алюмінатів кальцію, тому іноді його називають алюмінатним. Глиноземистий цемент отримують спіканням бідних бокситів (≈ 50 % Al_2O_3) та вапняку з наступним подрібненням шлаків, що містять алюмінат кальцію. Боксити з вмістом Al_2O_3 > 50 % йдуть на отримання чистого алюмінію.

Після обпалу отримують клінкер, а після спікання – сплав, що володіє високою твердістю. Він досить важко диспергується, у цьому і є причина високої вартості глиноземистого цементу. Крім того, кількість бокситів обмежена. Тому глиноземистий цемент випускається в значно менших кількостях, ніж портландцемент.

У результаті спікання глиноземистий цемент містить мінерали $CaO \cdot Al_2O_3$ (CA), $CaO \cdot Fe_2O_3$(CF), $CaO \cdot 2Al_2O_3$ (CA_2), $5CaO \cdot 3Al_2O_3$ (C_5A_3). Мінерал $2CaO \cdot Al_2O_3\ SiO_2$ (C_2AS) – геленіт є небажаною добавкою, так як не може гідравлічно твердіти.

Високоглиноземистий цемент отримують випалом вапняку та оксиду алюмінію з наступним подрібненням. Основні мінерали високоглиноземистого цементу C_2A і CA. Обидва цементи є вогнетривними, мають підвищену щільність та корозійну стійкість.

Твердіння основного мінералу алюмінатних цементів CA здійснюється за реакцією:

$$2(CA)+11H \rightarrow C_2AH_8 + 2Al(OH)_3(\text{гель}).$$

Реакція утворення восьмиводного двохкальцієвого гідроалюмінату протікає швидко. Вже через добу глиноземистий цемент показує високий опір, що складає приблизно 99 % від норми. Портландцемент вже через сутки має в 3–5 раз меншу міцність.

Пористість глиноземистого цементного каміння приблизно в 2 рази менше, ніж портландцементного. Структура отверділого глиноземистого цементу своєрідна – проміжки між кристалами C_2AH_8 заповнені гідроксидом алюмінію, який як би охоплює їх. Цим пояснюється підвищена стійкість глиноземистих цементів у воді, що містить $MgSO_4$, $CaSO_4$, сахарозу (магнезіальна та сульфатна корозія не протікають).

Але глиноземистий цемент руйнується навіть слабкими розчинами лугів, внаслідок амфотерної природи гідроксиду алюмінію с утворенням алюмінатів. Тому його не можна змішувати з портландцементом, вапняком та неможна використовувати в середовище, де містяться луги.

7.4. Використання промислових відходів у виробництві цементу

Сучасна тенденція пов'язана з уникненням універсальності використання портландцементу та розробкою вузькоспеціалізованих видів в'яжучих для різних областей будівництва, в яких пред'являються специфічні вимоги до конструкцій з бетону та залізобетону.

Виробництво портландцементного клінкеру − синтетичного випалювального матеріалу, який при помелі перетворюється на цемент − енергетично витратний процес, а великі викиди

вуглекислого газу (> 400 кг на тонну клінкеру) і пилу роблять його екологічно неповноцінним. Тому прагнення вчених-технологів спрямовані на зниження частки клінкеру у в'яжучому, в основному шляхом спільного помелу з кремнеземистими та іншими гірськими породами або промисловими відходами, головним чином, металургійними шлаками. Широко відомим продуктом технології змішаних цементів є шлакопортландцемент (вміст шлаку сягає 66−80%).

Шлакопортландцементом (ШПЦ) називається гідравлічне в'яжуче, одержуване шляхом тонкого подрібнення портландцементного клінкеру спільно з гранульованим доменним або електротермофосфорним шлаком, а також із двоводним гіпсом. Для отримання швидкотвердіючого ШПЦ порошок портландцементу іноді розмелюють з гранульованим шлаком. Шлаку в ШПЦ має бути не менше 21% і не більше 95% за масою.

Порівняно з портландцементом ШПЦ характеризується уповільненим наростанням міцності у початкові терміни твердіння, але марочна та наступні міцності його приблизно однакові. Зі зниженням температури зростання міцності ШПЦ сильно знижується. Водостійкість бетонів на ШПЦ вища, ніж на портландцементі, через відсутність вільного кальцій гідроксиду. Шлакопортландцементний бетон має задовільну морозостійкість і повітростійкість. Однак він все ж таки менш стійкий, ніж бетон на портландцементі.

ШПЦ застосовують у гідротехнічних спорудах, а також у конструкціях, що знаходяться у вологому середовищі. Не слід використовувати його в конструкціях, що зазнають частого заморожування та відтавання, зволоження та висихання. Швидкотвердіючий ШПЦ застосовують у виробництві залізобетонних виробів, що піддаються тепловологій обробці.

7.5. Вільна, адсорбційно- та хімічно-пов'язана вода в твердіючих в'яжучих на основі портландцементу

Здатність твердих тіл до взаємодії з водою визначається властивостями цих тіл: хімічним та мінеральним складом, типом

кристалічних ґрат, станом поверхні та багатьма іншими факторами. Сила зчеплення твердих частинок у вологому матеріалі залежить від величини енергії взаємодії молекул води та твердої фази на межі фаз, а також від товщини прошарку рідини між частинками, що визначає структурно-механічні та реологічні властивості дисперсних систем. *Класифікація форм зв'язку води з твердою фазою* в дисперсних системах (А.К. Ларіонов), в якій виділяються групи води за агрегатним станом та підгрупи – за співвідношенням молекулярних ($F_м$) та гравітаційних ($F_{гр}$) сил:

● *Хімічно зв'язана вода* утримується в кристалічній структурі твердої речовини міцними іонними та ковалентними зв'язками, і таку воду можна видалити з матеріалу при температурах понад 110ºС.

● *Фізико-хімічно або адсорбційно зв'язану воду* поділяють на міцно- і рихлозв'язану воду. До міцнозв'язаної води відносять ближні шари адсорбованої води, молекули якої жорстко орієнтовані нормалі до поверхні і утримуються силовим молекулярним полем твердої поверхні. Основна роль в утриманні міцнозв'язаної води належить водневим зв'язкам, енергія зв'язку яких становить 8−40 кДж/моль. Ця вода може бути видалена з поверхні при тиску 1000 МПа або за температур 105−110ºС.

Рихлозв'язана вода утримується за рахунок вторинної орієнтації дипольних молекул внаслідок диполь-дипольної взаємодії з молекулами міцнозв'язаної води. У міру віддалення від твердої поверхні ступінь орієнтації дипольних молекул безперервно зменшується і ділення фізико-хімічно зв'язаної води на міцно- і рихлозв'язану можна вважати досить умовним.

Фізико-хімічно зв'язана вода не передає гідростатичного тиску і її можна видалити з матеріалу лише у вигляді пари при тепловому сушінні. Капілярна вода передає гідростатичний тиск і може переміщатися у вологому матеріалі у вигляді рідини і при значному ущільненні вологого матеріалу капілярна вода з нього вичавлюється.

7.6. Активність промислових відходів, що використовуються у виробництві будівельних матеріалів

Хіміко-мінералогічний склад промислових відходів є вирішальним під час вибору можливих шляхів їх використання. Причому, чим вищий вміст у відході основних оксидів, тим активніше він вступає у взаємодії. Тому визначення величини кислотності водної витяжки відходів дозволяє опосередковано оцінити активність та реакційну здатність досліджуваних речовин.

Добуток концентрацій Гідроген і гідроксид-іонів іонів у хімічно чистій воді є постійною величиною, що дорівнює 10^{-14} за 25 ^{o}C. Воно залишається незмінним і в присутності речовин, що дисоціюють з утворенням Гідроген і гідроксид-іонів. У чистій воді концентрації H^+ та OH^--онів рівні 10^{-7} моль/л, що відповідає нейтральному стану розчину. У кислих розчинах H^+ $>10^{-7}$ моль/л, а у лужних H^+ $<10^{-7}$ моль/л.

Для зручності вираження концентрації Гідроген-іонів у воді використовують величину, що є взятим із зворотним знаком десятковим логарифмом їх концентрації. Ця величина називається водневим показником та позначається pH ($pH = -\lg H^+$). Для визначення pH розчинів застосовують іонометри, принцип дії яких заснований на вимірі електрорушійної сили у досліджуваному розчині між допоміжним та вимірювальним електродами.

Активність відходів можна оцінювати за їх сорбційною здібністю. У якості віходів-адсорбентів для очистки промислових стічних вод застосовують шлаки, золи та ін. Для таких адсорбентів характерна висока пористість і дисперсність та низька вартість. В процесі очищення стічних вод можлива зміна їх pH. Ефективність використання відходів-адсорбентів оцінюють за дозировкою адсорбенту і часом обробки на pH стічних вод.

Практична частина

1. Визначити вміст меленого доменного шлаку на 5 т клінкеру портландцементу марки «500» і марку шлакопортландцементу, якщо шлак у своєму складі має 60% активного кремнезему, а клінкер портландцементу має у своєму складі 50% трикальцієвого силікату ($3CaO{\cdot}SiO_2$).

Розв'язання: Припустимо, що при гідратації $3CaO{\cdot}SiO_2$ протікає наступна реакція

$$\underset{228}{\overset{2500}{3CaO{\cdot}SiO_2}} + 5H_2O \rightarrow 2CaO{\cdot}SiO_2{\cdot}4H_2O + \underset{74}{\overset{x}{Ca(OH)_2}}.$$

Вказані молярні маси $3CaO{\cdot}SiO_2$ і вапна і маса $3CaO{\cdot}SiO_2$, що приймає участь в реакції (5000·0,5=2500 кг). Звідси знаходимо масу вапна, що утворюється

$$m_{\text{вапна}} = \frac{2500 \cdot 74}{228} = 811 \text{ кг}.$$

Вапно зв'язується активним кремнеземом за реакцією

$$\underset{74}{\overset{811}{Ca(OH)_2}} + \underset{60}{\overset{y}{SiO_2}} + 3H_2O \rightarrow CaO{\cdot}SiO_2{\cdot}4H_2O$$

Знаходимо масу активного кремнезему в $CaO{\cdot}SiO_2{\cdot}4H_2O$

$$m_{SiO_2} = \frac{811 \cdot 60}{74} = 658 \text{ кг}.$$

Маса шлаку з урахуванням 60%-ого вмісту у ньому активного кремнезему складає

$$m_{\text{шлака}} = \frac{658 \cdot 100}{60} = 1096 \text{ кг}.$$

Вміст клінкера у загальній масі «клінкер + шлак» дорівнює

$$\omega_{\text{клінкера}} = \frac{5000 \cdot 100}{1095 + 5000} = 82\%,$$

звідси вміст шлаку дорівнює 18%.

Активність шлакопортландцементу

$$500 \cdot 0{,}82 = 410 \text{ кг/см}^2,$$

що відповідає марці цементу М400.

Відповідь: Вміст клінкера у ШПЦ − 18%; марка ШПЦ − М400.

2. Розрахувати вміст хімічно зв'язаної води у цементному камені при наступному мінералогічному складі портландцементу: C_3S – 50%, C_2S – 25%, C_3A – 5%, C_4AF – 18%. Вказати кінцеві продукти процесі гідролізу і гідратації клінкерних мінералів.

Розв'язання: Приймаємо, що з гідратації цементу протікають такі реакції

1 – $3CaO \cdot SiO_2 + 5H_2O \rightarrow 2CaO \cdot SiO_2 \cdot 4H_2O + Ca(OH)_2$;

2 – $2CaO \cdot SiO_2 + 2H_2O \rightarrow 2CaO \cdot SiO_2 \cdot 2H_2O$;

3 – $3CaO \cdot Al_2O_3 + 6H_2O \rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O$;

4 – $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3 + 7H_2O \rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O + CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot H_2O$.

Розрахуємо молекулярні маси продуктів кожної реакції та вміст у них води

1 – $2 \cdot 56 + 60 + 4 \cdot 18 + 74 = 318$;

Вміст води $\frac{(72+18) \cdot 100}{318} = 28{,}3\%$.

2 – $2 \cdot 56 + 60 + 2 \cdot 18 = 208$;

Вміст води $\frac{36 \cdot 100}{208} = 17{,}3\%$.

3 – $3 \cdot 56 + 102 + 6 \cdot 18 = 378$;

Вміст води $\frac{108 \cdot 100}{378} = 28{,}57\%$.

4 – $3 \cdot 56 + 102 + 6 \cdot 18 + 56 + 160 + 18 = 612$;

Вміст води $\frac{126 \cdot 100}{612} = 20{,}58\%$.

Кількість води, яка потрібна для гідратації цементу заданого мінералогічного складу, дорівнює:

$$28{,}3 \cdot 0{,}5 + 17{,}3 \cdot 0{,}25 + 28{,}57 \cdot 0{,}05 + 20{,}58 \cdot 0{,}18 = 23{,}6\%.$$

Відповідь: Вміст хімічно зв'язаної води у цементному камені дорівнює 23,6%.

3. Скільки потрібно пластифікуючої добавки для отримання 50 т пластифікованого портландцементу. Добавка СДБ містить 50% твердої речовини та 50% води. Оптимальний вміст добавки СДБ становить 0,2% маси цементу (на суху речовину СДБ).

Розв'язання: Для приготування 50 т пластифікованого портландцементу необхідно ввести 0,2% СДБ від маси цементу (на суху речовину)

$$50000 \cdot 0{,}002 = 100 \text{ кг сухої речовини.}$$

Кількість водного розчину СДБ 50%-ної концентрації дорівнює

$$100/50 = 200 \text{ кг.}$$

Відповідь: Потрібно 200 кг 50%-ого водного розчину СДБ.

4. Оцініть активність та реакційну здатність трьох видів гранульованих доменних шлаків щодо зміни величини pH їх водних витяжок у часі (експериментальні дані представлені у таблиці 7.2). Попередньо наважки шлаків поміщали у посудині з 300 мл дистильованої води, фіксуючи час приливання води. Через певні інтервалі часу з верхньої третини судини відбирали проби об'ємом 50 мл для визначення pH на іономірі.

Таблиця 7.2

Шлак №	Значення pH для часу виміру, хв				
	2	5	10	15	20
1	6,5	8,7	9,6	10,3	11,0
2	8,3	9,2	9,5	9,8	9,9
3	6,4	7,8	8,3	8,5	9,0

Розв'язання: За експериментальними даними побудуємо графічну залежність «pH–час» для трьох видів шлаку (рис. 7.1).

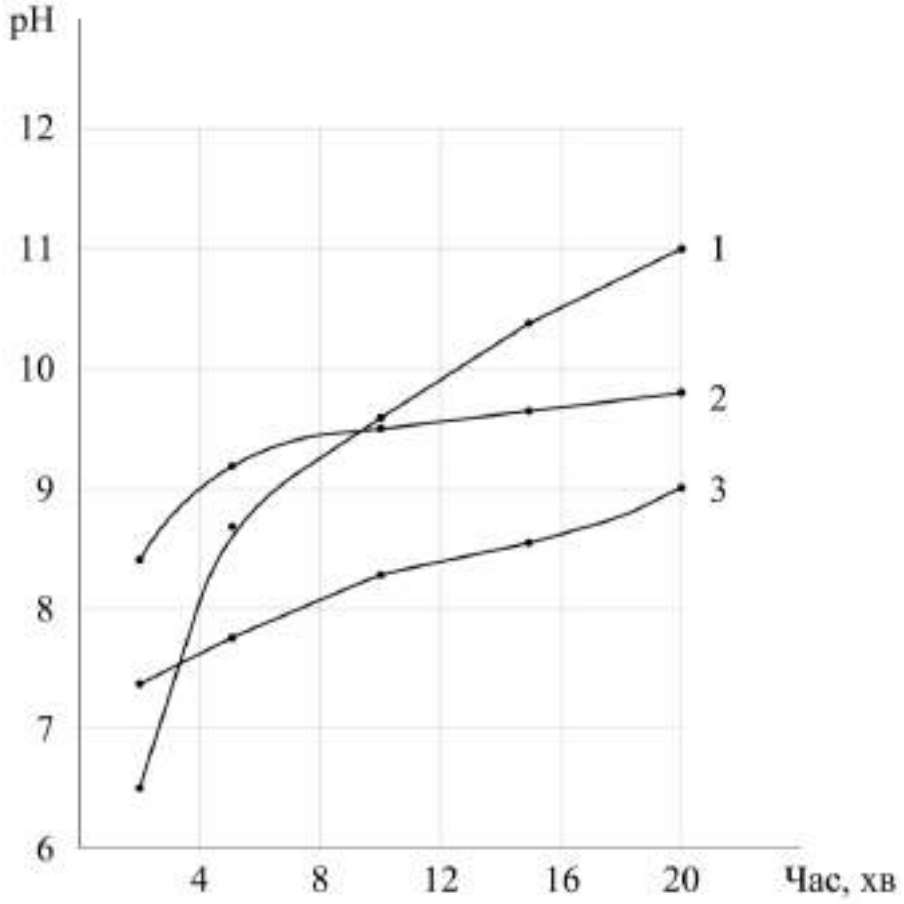


Рис. 7.1. Зміна pH дистильованої води у часі при вимивані вапна з доменних шлаків (номера кривих відповідають номерам шлаків з таблиці 7.2).

Виходячи із виду кривих 1–3 можна розташувати шлаки у ряд зменшення їх активності «Шлак №1 > Шлак №2 > Шлак №3». Шлак №1 є найбільш активним, тому що, по-перше, за 20 хв у водній витяжці досягається максимальне значення pH = 11, по-друге, крива має висхідний вид. Можна зробити висновок про більший вміст вільного вапна CaO у складі шлаку №1.

Відповідь: найбільш активним і реакційно здатним є гранульований доменний шлак №1.

5. Охарактеризуйте вплив дозування золи винесення і часу обробки стічної води золою на значення pH стічних вод (експериментальні дані представлені у таблиці 7.3). Попередньо наважки золи винесення поміщали у посудині з 200 мл промислової стічної води, фіксуючи час приливання води. Через певні інтервалі часу з верхньої третини судини

відбирали проби об'ємом 50 мл для визначення pH на іономірі.

Таблиця 7.3

Навжка золи винесення, г	Значення pH для часу виміру, хв				
	2	5	10	15	20
1,5	8,0	9,0	10,1	10,2	10,1
3	8,8	10,0	11,3	11,6	12,0
5	9,2	11,3	11,8	11,7	11,8

Розв'язання: За експериментальними даними побудуємо графічну залежність «pH–час» для трьох дозувань золи винесення (рис. 7.2). За *S*-подібним характером кривих видно, що швидке зростання pH стічної води у початковій інтервал часу до 10 хв змінюється ділянкою з постійним значенням pH. Таким чином, можна рекомендувати обмежити час контактування золи як адсорбенту зі стічною водою 10 хвилинами.

Зростання дози золи винесення збільшує значення pH (крива 3, рис. 7.2), що особливо ефективно в інтервалі часу до 10 хв. При необхідності забезпечення більшого часу контакту «зола–стічна вода» можливо зменшення дози золи (крива 2, рис. 7.2).

Механізм очистки золою стічних вод можна пояснити наступним чином. Зола винесення містить вільне вапно CaO, тому має лужний характер. При контакті золи зі стічною водою зростає лужність рідкої фази, в осад випадає більша частина гідроксидів металів. Таким чином, одночасно зменшується кислотність стічних вод і підвищується ефективність їх очистки від метало-іонів.

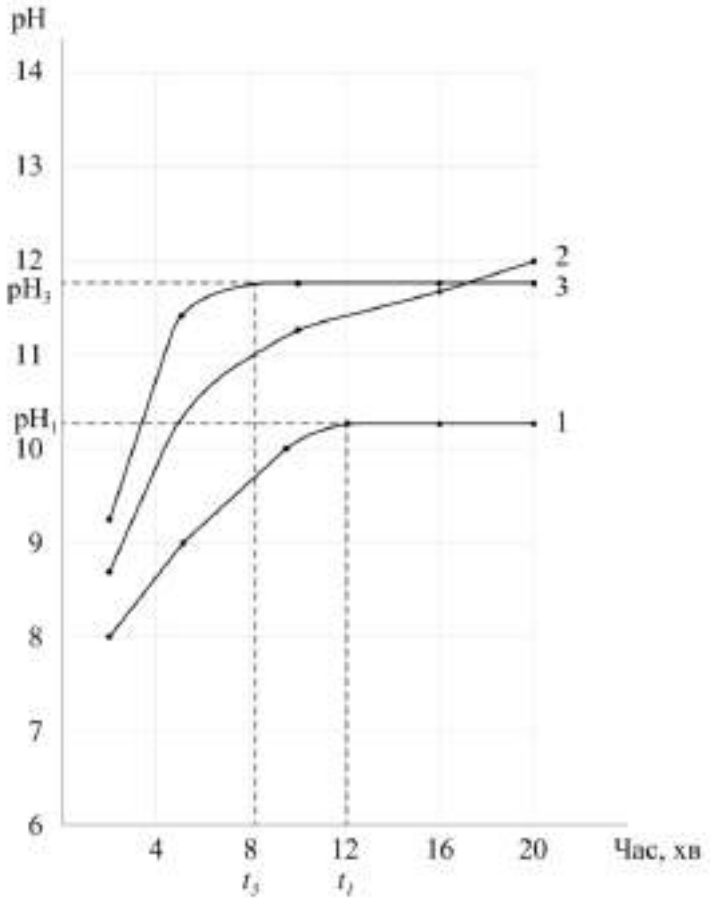


Рис. 7.2. Зміна pH стічної води об’ємом 200 мл у часі при контакті наважок золи винесення масою, г: 1 – 1,5; 2 – 3; 3 – 5.

Відповідь: В залежності від часу протікання процесу очистки стічних вод можна рекомендувати два дозування золи винесення. У часовому інтервалі очистки до 10 хв дозування золи винесення дорівнює 25 г/л; при інтервалі очистки більше 10 хв − дозування золи винесення 15 г/л.

Завдання для самоконтролю

1. Оксиди яких елементів мають в'яжучі властивості?
2. Які оксиди входять до складу портландцементу?
3. Які властивості виявляють різні компоненти портландцементу?
4. Як відбувається гідратація та гідроліз компонентів портландцементу? Складіть рівняння реакцій.
5. Які сполуки входять до складу цементного каменю?

6. Які форми зв'язаної води можуть знаходитись у порах цементного каменю?

7. Які добавки можуть прискорити чи уповільнити процес твердіння цементу?

8. Як впливає температура на процес затвердіння цементу?

9. Який мінерал є основним у складі глиноземистого цементу?

10. Як відбувається гідратація компонентів глиноземистого цементу? Складіть рівняння реакцій.

11. Оцініть активність та реакційну здатність трьох видів гранульованих доменних шлаків щодо зміни величини pH їх водних витяжок у часі (експериментальні дані представлені у таблиці). Попередньо наважки шлаків поміщали у посудині з 300 мл дистильованої води, фіксуючи час приливання води. Через певні інтервалі часу з верхньої третини судини відбирали проби об'ємом 50 мл для визначення pH на іономері.

Таблиця

Шлак №	Значення pH для часу виміру, хв				
	2	5	10	15	20
1	8,7	10,9	12,0	12,3	12,3
2	10,5	11,3	11,9	12,0	12,2
3	7,8	9,1	9,6	9,8	9,7

12. Охарактеризуйте вплив дозування золи винесення і часу обробки стічної води золою на значення pH стічних вод (експериментальні дані представлені у таблиці). Попередньо наважки золи винесення поміщали у посудині з 200 мл промислової стічної води, фіксуючи час приливання води. Через певні інтервалі часу з верхньої третини судини відбирали проби об'ємом 50 мл для визначення pH на іономері.

Таблиця

Навжка золи винесення, г	Значення pH для часу виміру, хв				
	2	5	10	15	20
1,5	8,8	9,7	11,1	11,3	11,2
3	10,0	11,2	12,5	12,7	12,8
5	10,5	12,6	13,1	13,1	13,0

Література

1. Дворкін Л.Й., Мироненко А.В. Будівельні матеріали та вироби із застосуванням промислових відходів: навч. посібнник – Рівне: НУВГП, 2019. – 298 с.

2. Борисовська О.О. Інвентаризація та облік відходів: навч. посібник – Дніпро: Літограф, 2017. – 168 с.

3. Канюк Г.І., Пугачова Т.М., Без'язичний В.Ф., Близниченко О.М., Шматков Д.І. Основи енерго- і ресурсозбереження: навч. посібник. – Харків: друкарня "Мадрид", 2016. – 230 с.

4. Управління та поводження з відходами: Підручник/ Т.П. Шаніна, О.Р. Губанова, М.О. Клименко, Т.А. Сафранов, В.Ю. Коріневська, О.О. Бєдункова, А.І. Волков. За ред Т.А. Сафранова, М.О. Клименка. Одеса, 2019. – 258 с.

5. Управління та поводження з відходами. Частина 2. Тверді побутові відходи / В. Г. Петрук, І. В. Васильківський, С. М. Кватернюк, [та ін.]. Вінниця: ВНТУ, 2015. − 100 с.

6. Екотехнологія в будівництві: навч. посібник / за ред. Р.А. Кизими – Харків: Бурун Книга, 2007. – 234 с.

7. Dvorkin L., Dvorkin O., Ribakov Y. Conctruction Materials Based on Industrial Waste Products. Nova science publishers, 2-16. – 242 p.

8. Дворкін Л.Й., Дворкін О.Л. Основи бетонознавства. К.: Основа, 2007. – 616 с.

9. Кривенко П.В., Пушкарьова К.К., Кочевих М.О. Заповнювачі для бетону: підручник – К.: ФАДА ЛТД, 2001. – 399 с.

10. Удод В.М., Трофімович В.В., Волошкіна О.С. Техноекологія: навч. посібник – К.: КНУБА, 2007. – 195 с.

11. Shi C., Krivenko P.V., Roy D. Alkali-Activated Cements and Concretes. London, N.Y.: Taylor and Francis Group, 2006. – 376 p.

12. Утилізація та рекуперація відходів. Навчальний посібник / В.М. Кропівний, О.В. Медведева, А.В. Кропівна, О.В. Кузик // Загальна редакція В.М. Кропівного. – Кропивницький: ЦНТУ, Електронне видання, 2020. – 440 с.

ЗМІСТ

ВСТУП…….. 3
1. ПИЛОВЕ ЗАБРУДНЕННЯ ТА ЙОГО ВПЛИВ НА ЗДОРОВ'Я ЛЮДИНИ..... 4
Теоретична частина..... 4
1.1 Оцінка шкидливості пилу..... 4
1.2 ГДК пилу та його допустимий вміст..... 7
1.3 Аєрозолі фіброгенн дії..... 9
Практична частина..... 12
1.4 Визначення класифікаційної групи з дисперсності пилу..... 12
1.5 Розрахунки ГДК пилу та його допустимого вмісту..... 12
Завдання для самоконтролю…… 14
2. ОСНОВНІ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ..... 15
Теоретична частина..... 15
2.1 Види щільності будівельних матеріалів..... 15
2.2 Пористість і пустотність будівельних матеріалів..... 20
2.3 Водопоглинання будівельних матеріалів..... 22
Практична частина..... 23
Завдання для самоконтролю…… 33
3. ГІПСОВІ І ВАПНЯНІ В'ЯЖУЧІ РЕЧОВИНИ..... 35
Теоретична частина..... 35
3.1 Загальні відомості про неорганічні в'яжучі речовини..... 35
3.2 Гіпсові в'яжучі речовини..... 35
3.3 Види вапна..... 37
Практична частина..... 40
3.4 Розрахунки за перетворенням гіпсових в'яжучих речовин..... 40
3.5 Розрахунки за перетворенням вапняних в'яжучих речовин 45
Завдання для самоконтролю…… 48
4. СИТОВИЙ АНАЛІЗ..... 50
Теоретична частина..... 50

Практична частина..... 55
Завдання для самоконтролю…… 57
5. СЕДИМЕНТАЦІЙНИЙ АНАЛІЗ..... 58
Теоретична частина..... 58
5.1 Основи седиментаційного аналізу..... 58
5.2 Криві седиментації..... 60
Практична частина..... 63
5.3 Методика проведення експерименту..... 63
5.4 Обробка експериментальних даних..... 66
5.5 Побудова інтегральних та диференціальних кривих розподілу частинок за розмірами..... 67
Завдання для самоконтролю…… 70
6. ОЦІНКА ПРОМИСЛОВИХ ВІДХОДІВ ЯК СИРОВИНИ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА В'ЯЖУЧИХ РЕЧОВИН..... 72
Теоретична частина..... 72
6.1 Трикомпонентна діаграма для визначення складу сумішей..... 72
6.2 Марочність вторинної сировини для виробництва гіпсів..... 73
6.3 Оцінка гідравлічних властивостей гранульованих шлаків кольорової металургії..... 74
6.4 Оцінка кислотно-основних властивостей доменних шлаків 74
6.5 Оцінка гідравлічних властивостей доменних гранульованих шлаків..... 76
6.6 Хімічні критерії силікатного розпаду доменних шлаків..... 77
6.7 Гідравлічна активність золошлакових відходів..... 78
Практична частина..... 79
6.8 Використання трикомпонентної діаграми для визначення складу сумішей..... 79
6.9 Визначення марочності вторинної сировини для виробництва гіпсів..... 82
6.10 Кількісна оцінка гідравлічних властивостей гранульованих шлаків кольорової металургії..... 83
6.11 Кількісна оцінка кислотно-основних властивостей доменних шлаків..... 84
6.12 Кількісна оцінка гідравлічних властивостей доменних гранульованих шлаків..... 88
6.13 Визначення критеріїв силікатного розпаду доменних

шлаків..... 88
6.14 Кількісна оцінка гідравлічної активності золошлакових відходів..... 89
Завдання для самоконтролю…… 90
7. СУЧАСНІ В’ЯЖУЧІ РЕЧОВИНИ НА ОСНОВІ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТУ..... 92
Теоретична частина..... 92
7.1 Портландцемент як гідравлічна в’яжуча речовина..... 92
7.2 Взаємодія цементного клінкеру з водою (водозачинення цементу)..... 94
7.3 Алюмінатні цементи..... 96
7.4 Використання промислових відходів у виробництві цементу..... 97
7.5 Вільна, адсорбційно- та хімічно-пов'язана вода в твердіючих в'яжучих на основі портландцементу..... 98
7.6 Активність промислових відходів, що використовуються у виробництві будівельних матеріалів..... 100
Практична частина..... 101
Завдання для самоконтролю…… 106
ЛІТЕРАТУРА…….. 108