

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ
Київський національний університет будівництва і архітектури

**РОЗРАХУНКИ СКЛАДУ СИРОВИННИХ СУМІШЕЙ ПРИ
ВИРОБНИЦТВІ В'ЯЖУЧИХ РЕЧОВИН**

Методичні рекомендації
до виконання курсового проекту з дисципліни «В'яжучі речовини»
для студентів спеціальності 192 «Будівництво і цивільна інженерія»
спеціалізації 192.04 «Технологія будівельних конструкцій, виробів і
матеріалів»

Київ 2020

УДК 691.5

Укладачі: В.В. Троян, д-р техн. наук, професор;
А.А. Майстренко, канд. техн. наук, доцент;
О.П. Константиновський, канд. техн. наук, доцент
Н.В. Рогозіна, асистент

Рецензент: Р.Ф. Рунова, д.техн. наук, професор

Відповідальний за випуск В.І. Гоц, д-р техн. наук, професор

*Затверджено на засіданні кафедри технології будівельних
конструкцій і виробів, протокол № 11 від 19.02.2020року*

В авторській редакції

Р 64 Розрахунки складу сировинних сумішей при виробництві в'язучих речовин: Методичні рекомендації до виконання курсового проекту з дисципліни «В'язучі речовини» (Укл. Р.Ф. Рунова, В.В. Троян, А.А. Майстренко, О.П. Константиновський. – К.: КНУБА, 2020 – ...с.)

Розглянуто основні підходи щодо вивчення дисципліни.

Призначені для студентів спеціальності 192 «Будівництво і цивільна інженерія» спеціалізації 192.04 «Технологія будівельних конструкцій, виробів і матеріалів»

Загальні положення

Основу багатьох змішаних в'язучих складає високоактивна речовина - портландцементний клінкер. Від якості і кількості клінкеру залежать властивості шлакопортландцементу, пуцоланових цементів, композиційних цементів, цементів, які розширюються та напружуються, гіпсоцементнопуцоланових в'язучих тощо. Основним процесом технології виробництва клінкера є випалювання сировинної суміші. Управління цим процесом починається на стадії аналізу сировини і з врахуванням цього - проектування складу суміші.

При розробці технологічного регламенту на виробництво конкретного виду в'язучого, в тому числі змішаного, у складі курсового проекту по дисципліні «В'язучі речовини» студентам необхідно виконати розрахунок сировинної суміші. Методичні рекомендації по цьому питанню містяться в спеціальній літературі, користуватись якою не завжди можливо в силу тих чи інших причин. В зв'язку з цим в даному виданні запропоновані основні методики розрахунку сировинної суміші для випалювання портландцементного клінкера, які є по суті класичними [1-5] і знайшли використання в практиці цементного виробництва. Дані рекомендації доповнюють методичні вказівки до засвоєння курсу і призначені для виконання курсового проекту. Вони дозволяють придбати навички з розрахунку сировини для одержання в'язучих.

При виробництві портландцементу, глиноземистого цементу і ряду інших в'язучих речовин сировинна суміш складається з двох і більшого числа компонентів. У цих випадках виконується розрахунок сировинної суміші, який має на меті визначити кількісне співвідношення складових частин. Вірно виконаний розрахунок сировинної суміші є однією з важливих умов одержання в'язучих речовин, які задовольняють по якості заданим вимогам.

1. Основні принципи розрахунку сировинної суміші для портландцементного клінкеру

Склад портландцементного клінкеру характеризується: вмістом основних оксидів, значенням коефіцієнта насичення і модулів, вмістом основних клінкерних мінералів.

Вміст основних оксидів у портландцементному клінкері знаходиться в межах, %: CaO - 62-67, SiO_2 - 20-24, Al_2O_3 - 4-7, Fe_2O_3 - 2-5, MgO , SO_3 тощо - 1,5-4,0.

Коефіцієнт насичення KH коливається в межах 0,80-0,95, силікатний модуль n - 1,7-3,5, глиноземистий модуль p - 1,0-3,0, гідравлічний модуль m - 1,9-2,4.

Величини коефіцієнта насичення і модулів визначають за формулами:

$$KH = \frac{(CaO_{заг} - CaO_{віл}) - (1,65Al_2O_3 + 0,35Fe_2O_3 + 0,70SO_3)}{2,8(SiO_{2заг} - SiO_{2віл})}; \quad (1)$$

$$n = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3}; \quad (2)$$

$$p = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}; \quad (3)$$

$$m = \frac{(CaO_{заг} - CaO_{віл})}{(SiO_{2заг} - SiO_{2віл}) + Al_2O_3 + Fe_2O_3}, \quad (4)$$

де CaO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 тощо - вміст оксидів у портландцементному клінкері, %.

Вміст основних клінкерних мінералів у звичайному портландцементному клінкері знаходиться в межах, %: $3CaO \cdot SiO_2$ - 40-60, $2CaO \cdot SiO_2$ - 15-35, $3CaO \cdot Al_2O_3$ - 4-14, $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ - 10-18.

Найбільш розповсюджений спосіб розрахунку сировинної суміші за значеннями коефіцієнта насичення і модулів.

Кількість сировинних компонентів повинне бути на одиницю більше за кількість заданих характеристик. Тому, якщо задаються тільки величиною коефіцієнта насичення - сировинна суміш складається з двох компонентів; якщо, крім коефіцієнта насичення, задаються ще і величиною одного з модулів (силікатного або глиноземистого) - сировинна суміш повинна складатися з трьох компонентів тощо.

Для зручності розрахунків хімічний склад сировинних матеріалів приводять до суми, рівної 100%. Для цього множать вміст кожного оксиду на коефіцієнт k , який визначають шляхом ділення 100 на суму всіх оксидів.

Необхідно провести перевірочний аналіз чи сума всіх складових відрізняється від 100 % більш, ніж на 1 %. При підтвердженні одержаних раніше результатів (різниця > 1 %), необхідно продовжити аналіз і встановити, яка ще сполука міститься в речовині і в якій кількості.

Для спрощення розрахунків вміст одного з компонентів (звичайно знаходиться в меншій кількості) приймається рівним 1.

Всі розрахунки при розрахунку сировинної суміші ведуть із точністю до 0,001%, але бажано в особливості для багатоконпонентних сировинних сумішей, доводити точність розрахунків до 0,001%

У розрахункових формулах (1), (2) та інших прийняті скорочені позначення CaO - C , SiO_2 - S , Al_2O_3 - A , Fe_2O_3 - F . При цьому вміст оксидів у кожному з сировинних компонентів позначений наведеними буквами з індексом, що показує належність даного оксиду до того чи іншого компоненту. Вміст оксидів у готовому продукті позначено буквами без індексу, а в сировинній суміші - буквами з індексом 0.

2. Розрахунок двохкомпонентної сировинної суміші

Розрахунок двохкомпонентної сировинної суміші для портландцементу можна виконувати по коефіцієнту насичення або гідравлічному модулю. Обидва вони характеризують основність сировинної суміші, але користування коефіцієнтом насичення більш доцільно, оскільки у формулі його розрахунку (1) враховується з'єднання оксиду кальцію CaO з кремнеземом SiO_2 , глиноземом Al_2O_3 і оксидом заліза Fe_2O_3 не в однакових вагових співвідношеннях. Також формулою (1) передбачено, що при випалюванні клінкеру відбувається майже повне насичення оксидом кальцію глинозему та оксиду заліза; кремнезем SiO_2 не повністю насичується CaO при недостатній її кількості.

Розглянемо розрахунок двохкомпонентної сировинної суміші за коефіцієнтом насичення. Припустимо, що відомо хімічний склад обох вихідних матеріалів, а також задано коефіцієнт насичення. Приймаючи, що в сировинній суміші на одну вагову частину (далі – ваг.ч.) другого компоненту припадає x ваг.ч. першого, можна написати наступне рівняння:

$$\left. \begin{aligned} C_0 &= \frac{x C_1 + C_2}{x + 1}; & A_0 &= \frac{x A_1 + A_2}{x + 1}; \\ S_0 &= \frac{x S_1 + S_2}{x + 1}; & F_0 &= \frac{x F_1 + F_2}{x + 1} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Підставляючи вказані значення C_0 , S_0 , A_0 і F_0 спрощену формулу коефіцієнта насичення, прийняту для розрахунку сировинної суміші:

$$KH = \frac{C_0 - (1,65A_0 + 0,35F_0)}{2,8S_0} \quad (6)$$

При вирішуванні рівняння (6) відносно x , одержимо розрахункову формулу для визначення відношення між першим і другим компонентами

$$x = \frac{2,8S_2 \cdot KH + 1,65A_2 + 0,35F_2 - C_2}{C_1 - 2,8S_1 \cdot KH - 1,65A_1 - 0,35F_1} \quad (7)$$

У спрощеній формулі коефіцієнта насичення відсутні поправки на вільний окис кальцію і вільний кремнезем, оскільки неможливо точно вгадати їх вміст у клінкері. Необхідно прагнути до того, щоб у процесі випалювання оксид кальцію і кремнезем повністю зв'язались у клінкерні мінерали. У спрощеній формулі не враховується також кількість окису кальцію, зв'язаного сірчаним ангідридом, оскільки частина сірки, яка присутня в сировині у вигляді сульфідних сполук, вигорає і окислюється, а сірчаний ангідрид сірчаноокислих сполук внаслідок дисоціації при випалі частково вивірюється. Тому кількість SO_3 , яка залишилась також як вільних оксидів кальцію і кремнезему, можна визначити тільки після випалювання.

2.1. Приклад розрахунку двохкомпонентної сировинної суміші

Хімічний склад вихідних матеріалів наведений у табл. 1.

Таблиця 1

Хімічний склад сировинних матеріалів

| Компо- ненти | Вміст оксидів, % | | | | | | в.п.п. | Сума, % | n | p |
|--------------------------------|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|-----------------|--------|------------|------|------|
| | CaO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MgO | SO ₃ | | | | |
| 1-й ком- понент - вапняк | 49,09 | 7,84 | 1,66 | 1,05 | 0,92 | - | 40,03 | 100,59 | 2,89 | 1,58 |
| 2-й ком- понент - глина | 1,89 | 64,37 | 16,46 | 8,15 | 0,89 | 0,79 | 7,17 | 99,72 | 2,62 | 2,02 |
| в перерахунку на 100 % | | | | | | | | | | |
| 1-й ком- понент - вапняк | 48,80 | 7,80 | 1,65 | 1,04 | 0,91 | - | 39,80 | 100,00 | - | - |
| 2-й ком- понент - глина | 1,90 | 64,55 | 16,51 | 8,17 | 0,89 | 0,79 | 7,19 | 100,00 | - | - |

В даному випадку при перерахунку на 100 % значення коефіцієнта виявились наступними:

$$k_1 = \frac{100}{100,59} = 0,9941, \quad k_2 = \frac{100}{99,72} = 1,0028.$$

Як вже вказувалось, при розрахунку двохкомпонентної сировинної суміші задаються лише значенням коефіцієнта насичення, за яким і визначають відношення між сировинними компонентами. Впливати на зменшення або збільшення одного з модулів одночасно з коефіцієнтом насичення не можна без введення третього компонента, тому виготовлення сировинної шихти з двох компонентів можливо тільки в тому випадку, якщо значення силікатного і глиноземистого модулів глинистого компонента лежать у межах, допустимих для портландцементу. При цьому у випадку присутності у вапняковому компоненті великої кількості кислотних окислів слід враховувати і величину модулів цього компонента, підраховуючи (приблизно) очікувану величину модулів сировинної суміші. Якщо ж величина силікатного і глиноземистого модулів глинистого компонента дуже велика або мала, то задаються бажаною величиною

даного модуля і для її досягнення вводять у сировинну суміш третій компонент із відповідно меншою або більшою величиною цього модуля.

З матеріалів, склад яких наведений у таблиці 1, можна отримати сировинну шихту, оскільки величини силікатного і глиноземистого модулів глини припустимі для портландцементу.

Визначаємо відношення між двома сировинними компонентами, задаючись величиною коефіцієнту насичення, що дорівнює 0,88.

$$x = \frac{2,8 \cdot 64,55 \cdot 0,88 + 1,65 \cdot 16,51 + 0,35 \cdot 8,17 - 1,90}{48,80 - 2,8 \cdot 7,80 \cdot 0,88 - 1,65 \cdot 1,65 - 0,34 \cdot 1,04} = \frac{187,25}{26,50} = \frac{7,006}{1}.$$

Таким чином, на 1 ваг.ч глини припадає 7,006 ваг.ч. вапняку. Сировинна суміш буде складатися з 87,60 % вапняку (1-й компонент) і 12,40 % глини (2-й компонент).

Розраховуємо хімічний склад сировинної суміші і клінкеру (табл. 2).

Таблиця 2

Підрахунок хімічного складу сировинної суміші і клінкеру

| Компоненти | Вміст оксидів, % | | | | | | в.п.п. | Сума, % |
|------------------|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|-----------------|--------|------------|
| | CaO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MgO | SO ₃ | | |
| Вапняк (87,60 %) | 42,75 | 6,83 | 1,45 | 0,91 | 0,80 | - | 34,86 | 87,60 |
| Глина (12,40 %) | 0,24 | 8,00 | 2,05 | 1,01 | 0,11 | 0,10 | 0,89 | 12,40 |
| Сировинна суміш | 42,99 | 14,83 | 3,50 | 1,92 | 0,91 | 0,10 | 35,75 | 100,00 |
| Клінкер | 66,91 | 23,08 | 5,45 | 2,99 | 1,42 | 0,15 | - | 100,00 |

Склад клінкеру (табл.2) визначаємо шляхом перерахунку складу сировинної суміші на випалену речовину. Для зручності розрахунку складу клінкеру рекомендується замість ділення значення кожного оксиду на суму всіх оксидів і множення на 100 помножити кількість кожного окисла на коефіцієнт k :

$$k = \frac{100}{100 - \text{в.п.п.}} = \frac{100}{100 - 35,75} = 1,55642.$$

Визначаємо величину коефіцієнта насичення, силікатного і глиноземистого модулів:

$$KH = \frac{66,91 - 1,65 \cdot 5,45 - 0,35 \cdot 2,99}{2,8 \cdot 23,08} = 0,88,$$

$$n = \frac{23,08}{5,45 + 2,99} = 2,73,$$

$$p = \frac{5,45}{2,99} = 1,82.$$

Співпадіння одержаної величини коефіцієнта насичення з заданою підтверджує правильність розрахунків. Величини силікатного і глиноземистого модулів лежать у допустимих межах.

При розрахунках двохкомпонентної сировинної суміші по гідравлічному модулю внаслідок підставлення у спрощену формулу гідравлічного модуля $m = C_0/(S_0+A_0+F_0)$ значення C , S , A і F для сировинних компонентів і вирішування рівняння відносно x отримують формулу для розрахунку:

$$x = \frac{C_2 - m \cdot (S_2 + A_2 + F_2)}{m \cdot (S_1 + A_1 + F_1) - C_1} \quad (8)$$

Користуючись цією формулою, ведуть розрахунок аналогічно попередньому.

3. Розрахунок трикомпонентної сировинної суміші

При розрахунку трикомпонентної сировинної суміші слід задаватися двома характеристиками портландцементного клінкера - коефіцієнтом насичення і силікатним модулем.

У випадку, коли силікатний модуль є другою заданою характеристикою, вибір третього компоненту (корегуюча добавка) залежить від того, чи треба підвищити або понизити силікатний модуль. Для підвищення силікатного модуля використовують матеріали з високим

вмістом кремнезему (трепел, глина з високим вмістом SiO_2 , пісок тощо), для зменшення - матеріали з високим вмістом глинозему або оксиду заліза (колчеданні огарки, колошниковий пил, залізна руда, глина з високим вмістом Al_2O_3 , боксити тощо). Вибір глиноземного або залізного матеріалу здійснюється в залежності від того, чи треба змінити глиноземний модуль одночасно із силікатним.

Якщо другою заданою характеристикою є глиноземистий модуль, тоді для підвищення його значення в якості корегуючих добавок використовують високоглиноземисті глини і боксити, а для зниження - колчеданні огарки, колошниковий пил і залізну руду. Понизити глиноземистий модуль порівняно легко через доступність корегуючих добавок, які для цього використовують; підвищити ж глиноземистий модуль значно складніше через малу розповсюдженість бокситів і багатих глиноземистих глин. Введення добавок для коригування глиноземистого модуля знижує величину силікатного модуля.

Приймаючи, що в сировинній суміші на 1 ваг.ч. третього компонента приходить x ваг.ч. першого компонента і y ваг.ч. другого, можна написати наступні рівняння:

$$\left. \begin{aligned} C_0 &= \frac{x C_1 + y C_2 + C_3}{x + y + 1}; & A_0 &= \frac{x A_1 + y A_2 + A_3}{x + y + 1}; \\ S_0 &= \frac{x S_1 + y S_2 + S_3}{x + y + 1}; & A_0 &= \frac{x F_1 + y F_2 + F_3}{x + y + 1}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Підставляючи у формулу вказані значення коефіцієнта насичення і силікатного модуля

$$KH = \frac{C_0 - 1,65 A_0 - 0,35 F_0}{2,8 S_0};$$

$$n = \frac{S_0}{A_0 + F_0}$$

одержимо систему лінійних рівнянь із двома невідомими:

$$\begin{aligned} & x \cdot (C_1 - 2,8 \cdot S_1 \cdot KH - 1,65 \cdot F_1 - 0,35F_1) + \\ & + (C_2 - 2,8 \cdot S_2 \cdot KH - 1,65 \cdot F_2 - 0,35F_2) = \\ & = 2,8 \cdot S_3 \cdot KH + 1,65 \cdot F_3 + 0,35F_1 - C_3; \\ & x \cdot (S_1 - nA_1 - nF_1) - y \cdot (S_2 - nA_2 - nF_2) = nA_3 + nF_3 - S_3. \end{aligned}$$

Для зручності розрахунків приймемо наступні скорочені позначення:

$$\begin{aligned} a_1 &= C_1 - 2,8S_1 \cdot KH - 1,65A_1 - 0,35F_1; \\ a_2 &= S_1 - nA_1 - nF_1; \\ b_1 &= C_2 - 2,8S_2 \cdot KH - 1,65A_2 - 0,35F_2; \\ b_2 &= S_2 - nA_2 - nF_2; \\ c_1 &= 2,8S_3 \cdot KH + 1,65A_3 + 0,35F_3 - C_3; \\ b_2 &= S_2 - nA_2 - nF_2; \\ c_2 &= nA_3 + nF_3 - S_3. \end{aligned}$$

Підставляючи ці скорочені позначення в лінійні рівняння одержимо

$$\begin{aligned} a_1 \cdot x + b_1 \cdot y &= c_1; \\ a_2 \cdot x + b_2 \cdot y &= c_2. \end{aligned}$$

Рішаючи цю систему рівнянь з двома невідомими, одержимо наступні значення x і y :

$$x = \frac{c_1 b_2 - c_2 b_1}{a_1 b_2 - a_2 b_1}; \quad (10)$$

$$y = \frac{a_1 c_2 - a_2 c_1}{a_1 b_2 - a_2 b_1}. \quad (11)$$

3.1. Приклад розрахунку трьохкомпонентної сировинної суміші

Хімічний склад вихідних матеріалів, перерахований на 100%, наведений у таблиці 3.

Таблиця 3

Хімічний склад сировинних матеріалів

| Компоненти | Вміст оксидів, % | | | | | | в.п.п. | Сума, % | <i>n</i> | <i>p</i> |
|-------------------|------------------|------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------|-----------------------|--------|---------|----------|----------|
| | <i>CaO</i> | <i>SiO₂</i> | <i>Al₂O₃</i> | <i>Fe₂O₃</i> | <i>MgO</i> | <i>SO₃</i> | | | | |
| Вапняк | 54,15 | 0,69 | 1,15 | 0,52 | 0,49 | 0,12 | 42,88 | 100,00 | 0,41 | 2,21 |
| Глина | 2,71 | 73,79 | 14,98 | 3,65 | 1,75 | 0,29 | 2,83 | 100,00 | 3,96 | 4,10 |
| Колчеданні огарки | 2,10 | 13,94 | 1,44 | 78,40 | 0,22 | 3,10 | 0,80 | 100,00 | 0,17 | 0,02 |

Задаємося коефіцієнтом насичення $KH = 0,9$ і силікатним модулем $n = 2,3$. Силікатний модуль глини значно перевищує задану величину. Низький силікатний модуль вапняку лише незначно знизить силікатний модуль сировинної суміші, оскільки вміст у вапняку кислотних оксидів дуже малий. Оскільки з пониженням величини силікатного модуля треба понизити і величину глиноземистого модуля, в якості третього компонента вибираємо колчеданні огарки, тобто матеріал, багатий окисом заліза.

Визначаємо відношення між сировинними компонентами:

$$a_1 = 54,15 - 2,8 \cdot 0,69 \cdot 0,90 - 1,65 \cdot 1,15 - 0,35 \cdot 0,52 = 50,33;$$

$$b_1 = 2,71 - 2,8 \cdot 73,79 \cdot 0,90 + 1,65 \cdot 14,98 - 0,35 \cdot 3,65 = -209,24;$$

$$c_1 = 2,8 \cdot 13,94 \cdot 0,90 + 1,65 \cdot 1,44 + 0,35 \cdot 78,40 - 2,10 = 62,85;$$

$$a_2 = 0,69 - 2,3 \cdot 1,15 - 2,3 \cdot 0,52 = -3,16;$$

$$b_2 = 73,79 - 2,3 \cdot 14,98 - 2,3 \cdot 3,65 = 30,94;$$

$$c_2 = 2,3 \cdot 1,44 + 2,3 \cdot 78,40 - 13,94 = 169,69.$$

$$x = \frac{62,85 \cdot 30,94 - 169,69 \cdot (-204,24)}{50,33 \cdot 30,94 - (-3,16) \cdot (-209,24)} = 41,80;$$

$$y = \frac{50,33 \cdot 169,69 - (-3,16) \cdot 62,85}{50,33 \cdot 30,94 - (-3,16) \cdot (-209,24)} = 9,75.$$

Таким чином, у сировинній суміші на 1 ваг.ч огарків приходитьсья 41,80 ваг.ч. вапняку і 9,75 ваг.ч. глини. Отже, склад сировинної суміші становить, %: вапняк - 79,54, глина – 18,55, огарки – 1,91.

Вираховуємо хімічний склад сировинної суміші і клінкеру (табл. 4).

$$k = 1,530456; \quad KH = \frac{66,74 - 1,65 \cdot 5,69 - 0,35 \cdot 3,96}{2,8 \cdot 22,21} = 0,90;$$

$$n = \frac{22,21}{5,69 + 3,96} = 2,30; \quad p = \frac{5,69}{3,69} = 1,44.$$

Одержані значення коефіцієнта насичення і силікатного модуля показують, що розрахунок сировинної суміші виконаний правильно.

Таблиця 4

Підрахунок хімічного складу сировинної суміші і клінкеру

| Компоненти | Вміст оксидів, % | | | | | | в.п.п. | Сума, % |
|------------------|------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|-----------------|--------|------------|
| | CaO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | MgO | SO ₃ | | |
| Вапняк (79,54 %) | 43,07 | 0,55 | 0,91 | 0,41 | 0,39 | 0,10 | 34,11 | 79,54 |
| Глина (18,55 %) | 0,50 | 13,69 | 2,78 | 0,68 | 0,32 | 0,05 | 0,57 | 18,55 |
| Огарки (1,91 %) | 0,04 | 0,26 | 0,03 | 1,50 | 0,01 | 0,06 | 0,01 | 1,91 |
| Сировинна суміш | 43,61 | 14,50 | 3,72 | 2,59 | 0,72 | 0,21 | 34,65 | 100,00 |
| Клінкер | 66,74 | 22,21 | 5,69 | 3,69 | 1,09 | 0,31 | - | 100,00 |

4. Розрахунок чотирьохкомпонентної сировинної суміші

В цьому випадку слід задаватися трьома характеристиками портландцементного клінкеру - коефіцієнтом насичення, силікатним і глиноземистим модулями.

Приймаючи, що на 1 ваг.ч. четвертого компоненту приходиться x ваг.ч. першого компоненту, y ваг.ч. другого компоненту і z ваг.ч. третього компоненту, можна написати наступні рівняння:

$$\left. \begin{aligned} C_0 &= \frac{x C_1 + y C_2 + z C_3 + C_4}{x + y + z + 1}; & A_0 &= \frac{x A_1 + y A_2 + z A_3 + A_4}{x + y + z + 1}; \\ S_0 &= \frac{x S_1 + y S_2 + z S_3 + S_4}{x + y + z + 1}; & F_0 &= \frac{x F_1 + y F_2 + z F_3 + F_4}{x + y + z + 1}. \end{aligned} \right\} (12)$$

Підставляючи вказані значення в формули коефіцієнта насичення, силікатного і глиноземистого модулів:

$$KH = \frac{C_0 - 1,65A_0 - 0,35F_0}{2,8S_0};$$

$$n = \frac{S_0}{A_0 + F_0}; \quad p = \frac{A_0}{F_0}.$$

Одержимо систему трьох лінійних рівнянь із трьома невідомими:

$$\begin{aligned} x(2,8S_1 \cdot KH + 1,65A_1 + 0,35F_1 - C_1) + y(2,8S_2 \cdot KH + 1,65A_2 + \\ + 0,35F_2 - C_2) + z(2,8S_3 \cdot KH + 1,65A_3 + 0,35F_3 - C_3) = \\ = C_4 - 2,8S_4 \cdot KH - 1,65A_4 - 0,35F_4; \\ x(nA_1 + nF_1 - S_1) + y(nA_2 + nF_2 - S_2) + z(nA_3 + nF_3 - S_3) = \\ = S_4 - nA_4 - nF_4; \\ x(pF_1 - A_1) + y(pF_2 - A_2) + z(pF_3 - A_3) = A_4 - pF_4. \end{aligned}$$

Для зручності розрахунків приймемо наступні скорочені позначення:

$$\begin{aligned} a_1 &= 2,8S_1 \cdot KH + 1,65A_1 + 0,35F_1 - C_1; \\ b_1 &= 2,8S_2 \cdot KH + 1,65A_2 + 0,35F_2 - C_2; \\ c_1 &= 2,8S_3 \cdot KH + 1,65A_3 + 0,35F_3 - C_3; \\ d_1 &= C_4 - 2,8S_4 \cdot KH - 1,65A_4 - 0,35F_4; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
a_2 &= nA_1 + nF_1 - S_1; & a_3 &= pF_1 - A_1; \\
b_2 &= nA_2 + nF_2 - S_2; & b_3 &= pF_2 - A_2; \\
c_2 &= nA_3 + nF_3 - S_3; & c_3 &= pF_3 - A_3; \\
d_2 &= S_4 - nA_4 - nF_4; & d_3 &= A_4 - pF_4.
\end{aligned}$$

Підставивши ці скорочені позначення в лінійні рівняння, маємо наступне рівняння:

$$a_1x + b_1y + c_1z = d_1; \quad a_2x + b_2y + c_2z = d_2; \quad a_3x + b_3y + c_3z = d_3.$$

Розв'язуючи їх, одержимо після відповідних скорочень наступні значення для x , y і z :

$$x = \frac{d_1(b_2c_3 - b_3c_2) + d_2(b_3c_1 - b_1c_3) + d_3(b_1c_2 - b_2c_1)}{a_1(b_2c_3 - b_3c_2) + a_2(b_3c_1 - b_1c_3) + a_3(b_1c_2 - b_2c_1)}; \quad (13)$$

$$y = \frac{a_1(d_2c_3 - d_3c_2) + a_2(d_3c_1 - d_1c_3) + a_3(d_1c_2 - b_2d_1)}{a_1(b_2c_3 - b_3c_2) + a_2(b_3c_1 - b_1c_3) + a_3(b_1c_2 - b_2c_1)}; \quad (14)$$

$$z = \frac{a_1(b_2d_3 - b_3d_2) + a_2(b_3d_1 - b_1d_3) + a_3(b_1d_2 - b_2d_1)}{a_1(b_2c_3 - b_3c_2) + a_2(b_3c_1 - b_1c_3) + a_3(b_1c_2 - b_2c_1)}; \quad (15)$$

Користуючись наведеними формулами виконують розрахунок у тому ж порядку, як і для трьохкомпонентної сировинної суміші.

5. Розрахунок сировинної суміші для портландцементу заданого мінералогічного складу

Роботи [1-5] рекомендують заданий у клінкерних мінералах склад виразити з оксидах, а потім вести розрахунок аналогічно звичайному розрахунку чотирьохкомпонентної сировинної суміші. При цьому на 1 ваг.ч. четвертого компоненту приходиться x ваг.ч. першого компоненту, у ваг.ч. другого і z ваг.ч. третього.

Користуючись наведеними в таблиці 8 даними, можна вивести наступні формули для розрахунку хімічного складу клінкеру в % за його мінералогічним:

$$\left. \begin{aligned} CaO &= 0,7369C_3S + 0,6512C_2S + 0,6227C_3A + 0,4616C_4AF; \\ SiO_2 &= 0,2631C_3S + 0,3488C_2S; \\ Al_2O_3 &= 0,3773C_3A + 0,2098C_4AF; \\ Fe_2O_3 &= 0,3286C_4AF. \end{aligned} \right\} (16)$$

В наведених формулах приймається, що сума C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF як і сума найголовніших окислів CaO , SiO_2 , Al_2O_3 і Fe_2O_3 , дорівнює 100%.

Для C , S , A і F справедливі чотири рівняння:

$$C = \frac{x C_1 + y C_2 + z C_3 + C_4}{x + y + z = 1};$$

$$A = \frac{x A_1 + y A_2 + z A_3 + A_4}{x + y + z = 1};$$

$$S = \frac{x S_1 + y S_2 + z S_3 + S_4}{x + y + z = 1};$$

$$F = \frac{x F_1 + y F_2 + z F_3 + F_4}{x + y + z = 1}.$$

В цих рівняннях маємо три невідомі, для визначення яких беремо три останніх рівняння і виражаємо їх у наступному вигляді:

$$(S - S_1)x + (S - S_2)y + (S - S_3)z = S_4 - S;$$

$$(A - A_1)x + (A - A_2)y + (A - A_3)z = A_4 - A;$$

$$(F - F_1)x + (F - F_2)y + (F - F_3)z = F_4 - F.$$

Використовуючи скорочені позначення, отримаємо:

$$a_1 = S - S_1; \quad a_2 = A - A_1; \quad a_3 = F - F_1;$$

$$b_1 = S - S_2; \quad b_2 = A - A_2; \quad b_3 = F - F_2;$$

$$c_1 = S - S_3; \quad c_2 = A - A_3; \quad c_3 = F - F_3;$$

$$d_1 = S_4 - S; \quad d_2 = A_4 - A; \quad d_3 = F_4 - F,$$

можна записати наступні рівняння:

$$a_1x + b_1y + c_1z = d_1;$$

$$a_2x + b_2y + c_2z = d_2;$$

$$a_3x + b_3y + c_3z = d_3.$$

Виходячи з цих рівнянь, одержуємо формули для визначення значень x , y і z , аналогічні формулам (13), (14), (15).

6.1. Приклад розрахунку чотирьохкомпонентної сировинної суміші для одержання портландцементу заданого мінералогічного складу

Хімічний склад вихідних матеріалів, перерахований на 100%. наведений в табл.5.

Задаємось наступним мінералогічним складом портландцементу: C_3S - 50%; C_2S - 28%; C_3A - 10%; C_4AF - 12%. При цьому умовно приймаємо що сума цих основних мінералів складає 100%.

Приводимо хімічні склади сировинних матеріалів до суми $C+S+A+F$, що дорівнює 100 % (табл.6).

Таблиця 5

Хімічний склад сировинних матеріалів, %

| Компо- ненти | Вміст оксидів, % | | | | | | в.п.п. | Сума, % |
|-----------------|------------------|---------|-----------|-----------|-------|--------|--------|------------|
| | CaO | SiO_2 | Al_2O_3 | Fe_2O_3 | MgO | SO_3 | | |
| Крейда | 54,971 | 0,181 | 0,301 | 0,161 | 0,612 | 0,582 | 43,192 | 100,00 |
| Каолін | 0,499 | 47,248 | 38,126 | 0,448 | 0,419 | 0,797 | 12,463 | 100,00 |
| Опока | 1,880 | 79,746 | 9,302 | 4,321 | 1,320 | 0,320 | 3,111 | 100,00 |
| Огарки | 1,338 | 14,631 | 5,876 | 73,455 | 1,238 | 3,462 | - | 100,00 |

Хімічний склад сировинних матеріалів після приведення суми оксидів $SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3+CaO$ до 100%

| Компоненти | Вміст оксидів, % | | | | Сума, % |
|------------|------------------|---------|-----------|-----------|---------|
| | CaO | SiO_2 | Al_2O_3 | Fe_2O_3 | |
| Крейда | 98,844 | 0,325 | 0,541 | 0,290 | 100,00 |
| Каолін | 0,578 | 54,735 | 44,168 | 0,519 | 100,00 |
| Опока | 1,974 | 83,724 | 9,766 | 4,536 | 100,00 |
| Огарки | 1,404 | 15,352 | 6,166 | 77,078 | 100,00 |

На основі заданого мінералогічного складу визначаємо хімічний склад портландцементного клінкеру в основних оксидах:

$$SiO_2 = 0,2631 \cdot 50 + 0,3488 \cdot 28 = 22,921\%;$$

$$Al_2O_3 = 0,3773 \cdot 10 + 0,2098 \cdot 12 = 6,291\%;$$

$$Fe_2O_3 = 0,3286 \cdot 12 = 3,943\%;$$

$$CaO = 0,7369 \cdot 50 + 0,6512 \cdot 28 + 0,6227 \cdot 10 + 0,4616 \cdot 12 = 66,845\%.$$

Розраховуємо коефіцієнти за формулами:

$$a_1 = S - S_1 = 22,921 - 0,325 = 22,596;$$

$$b_1 = S - S_2 = 22,921 - 54,735 = -31,814;$$

$$c_1 = S - S_3 = 22,921 - 83,724 = -60,803;$$

$$d_1 = S_4 - S = 15,352 - 22,921 = -7,569;$$

$$a_2 = A - A_1 = 6,291 - 0,541 = 5,750;$$

$$b_2 = A - A_2 = 6,21 - 44,168 = -37,877;$$

$$c_2 = A - A_3 = 6,21 - 9,766 = -3,475;$$

$$d_2 = A_4 - A = 6,166 - 6,291 = -0,125;$$

$$a_3 = F - F_1 = 3,943 - 0,290 = 3,563;$$

$$b_3 = F - F_2 = 3,943 - 0,519 = 3,424;$$

$$c_3 = F - F_3 = 3,943 - 4,536 = -0,593;$$

$$d_3 = F_4 - F = 77,078 - 3,943 = 73,133.$$

Визначаємо числові значення двочленів, що входять в формули (13), (14) і (15):

$$\begin{aligned}b_2c_3 - b_3c_2 &= (-3,877) \cdot (-0,593) - 3,424 \cdot (-3,475) = 34,359; \\b_3c_1 - b_1c_3 &= 3,424 \cdot (-60,803) - (-31,814) \cdot (-0,593) = -227,055; \\b_1c_2 - b_2c_1 &= (-31,814) \cdot (-3,475) - (-37,877) \cdot (60,803) = -2192,482; \\d_2c_3 - d_3c_2 &= (-0,125) \cdot (-0,593) - 73,135 \cdot (-3,475) = 254,218; \\d_3c_1 - d_1c_3 &= 73,135 \cdot (-60,803) - (-7,569) \cdot (-0,593) = -4451,316; \\d_1c_2 - d_2c_1 &= (-7,569) \cdot (-3,475) - (-0,125) \cdot (-60,803) = 18,702; \\b_2d_3 - b_3d_2 &= (-37,877) \cdot (73,135) - 3,424 \cdot (-0,125) = -2769,706; \\b_3d_1 - b_1d_3 &= 3,424 \cdot (-7,569) - (-31,814) \cdot (73,135) = 2300,801; \\b_1d_2 - b_2d_1 &= (-31,814) \cdot (-0,125) - (-37,877) \cdot (-7,569) = -282,714.\end{aligned}$$

Потім визначаємо значення x , y і z за формулами (13), (14) і (15):

$$\begin{aligned}x &= \frac{(-7,569) \cdot 34,359 + (-0,125) \cdot (-227,055) + 73,135 \cdot (-2192,482)}{22,569 \cdot 34,359 + 5,750 \cdot (-227,055) + 3,653 \cdot (-2192,482)} = \\&= \frac{-160578,852}{-8538,327} = 18,87; \\y &= \frac{22,596 \cdot 254,218 + 5,750 \cdot (-4451,316) + 3,653 \cdot 18,702}{-8538,327} = \\&= \frac{-19782,439}{-8538,327} = 2,317; \\z &= \frac{22,596 \cdot (-2769,706) + 5,750 \cdot 2300,801 + 3,653 \cdot (-282,714)}{-8538,327} = \\&= \frac{-50387,425}{-8538,327} = 5,901.\end{aligned}$$

Враховуючи, що значення x , y і z відносяться до матеріалів, хімічні склади яких перераховані на суму $C+S+A+F$, рівну 100%, визначаємо значення x , y і z для природних матеріалів. Для цього кожне значення повинно бути помножене на 100 і розділене на сумарний фактичний вміст

C , S , A і F у відповідному матеріалі. Такий же перерахунок повинен бути зроблений і для четвертого компонента, кількість якого прийнято в розрахунках за 1.

Визначаємо відношення сировинних матеріалів:

$$1\text{-й компонент - крейда: } \frac{18,807 \cdot 100}{55,614} = 33,817;$$

$$2\text{-й компонент - каолін: } \frac{2,317 \cdot 100}{86,321} = 2,684;$$

$$3\text{-й компонент - опока: } \frac{5,901 \cdot 100}{95,249} = 6,195;$$

$$4\text{-й компонент - огарки: } \frac{1,100}{95,300} = 1,049.$$

Отже, склад сировинної суміші становить, %: крейда 77,305; каолін - 6,135; опока - 14,162 і огарки - 2.398.

Підраховуємо хімічний склад сировинної суміші і клінкеру (табл.7).

При підрахунках мінералогічного складу клінкера виходимо з умови, згідно якої сума чотирьох основних мінералів складає 100 %. При цьому користуємося рівняннями:

$$C_3S = 4,07C - 7,6S - 6,72A - 1,42F;$$

$$C_2S = 8,6S + 5,07A + 1,07F - 3,07C;$$

$$C_3A = 2,65 \cdot (A - 0,64F) = 2,65A - 1,07F;$$

$$C_4AF = 3,04F.$$

$$C_3S = 4,07 \cdot 66,847 - 7,6 \cdot 22,921 - 6,72 \cdot 6,291 - 1,42 \cdot 3,943 = 50,05\%;$$

$$C_2S = 8,6 \cdot 22,921 + 5,07 \cdot 6,291 + 1,07 \cdot 3,941 - 3,07 \cdot 66,847 = 28,01\%;$$

$$C_3A = 2,65 \cdot 6,291 - 1,70 \cdot 3,94 = 9,97\%;$$

$$C_4A = 3,04 \cdot 3,941 = 11,98\%.$$

Отримані цифри близькі до заданих, що свідчить про правильність розрахунків.

Таблиця 7

Підрахунок хімічного складу сировинної суміші і клінкеру

| Компоненти (%) | Вміст оксидів, % | | | | | | в.п.п. | Сума, % |
|--|------------------|------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------|-----------------------|--------|---------|
| | <i>CaO</i> | <i>SiO₂</i> | <i>Al₂O₃</i> | <i>Fe₂O₃</i> | <i>MgO</i> | <i>SO₃</i> | | |
| Крейда (77,305) | 42,459 | 0,140 | 0,233 | 0,124 | 0,473 | 0,450 | 33,389 | 77,305 |
| Каолін (6,135) | 0,031 | 2,899 | 2,339 | 0,027 | 0,026 | 0,049 | 0,765 | 6,135 |
| Опока – (14,162) | 0,266 | 11,294 | 1,317 | 1,761 | 0,030 | 0,083 | 0,441 | 14,162 |
| Огарки – (2,398) | 0,032 | 14,684 | 4,030 | 2,542 | 0,716 | 0,627 | - | 2,398 |
| Сировинна суміш | 42,824 | 14,684 | 4,030 | 2,542 | 0,716 | 0,958 | 34,595 | 100,00 |
| Клінкер | 65,475 | 22,451 | 6,162 | 3,859 | 1,095 | 0,958 | - | 100,00 |
| Склад клінкеру в перерахунку на суму $C+S+A+F$ | 22,291 | 6,291 | 3,941 | 66,847 | - | - | - | 100,00 |

Потім встановлюємо склад клінкеру з урахуванням вмісту MgO і SO_3 .

$$C_3S = 4,07 \cdot (65,475 - 0,7 \cdot 0,958) - 7,6 \cdot 22,451 - 6,72 \cdot 6,162 - 1,42 \cdot 3,859 = 46,24\%;$$

$$C_2S = 8,6 \cdot 22,451 + 5,07 \cdot 6,162 + 1,07 \cdot 3,859 - 3,07 \cdot (65,475 - 0,7 \cdot 0,958) = 29,50\%;$$

$$C_3A = 2,65 \cdot 6,162 - 1,70 \cdot 3,859 = 9,77\%;$$

$$C_4A = 3,04 \cdot 3,859 = 11,73\%;$$

$$C_4AF = 3,04 \cdot 3,859 = 11,73\%;$$

$$MgO = 1,10\%; CaSO_3 = 1,7SO_3 = 1,7 \cdot 0,958 = 1,63\%.$$

Іноді, виходячи з конкретних умов одержання клінкера, при розрахунку приймають, що в клінкері присутні вільні оксиди кальцію і кремнезему у невеликій кількості. Тоді з загальної кількості оксидів віднімають кількість оксиду, який не зв'язався, і одержану різницю вважають зв'язаною у відповідні мінерали. В перелік сполук, які входять до складу клінкеру, ввійдуть у ньому випадку $CaO_{\text{віль}}$ і $SiO_{2\text{віль}}$ (у рахунок 100%).

Усі вищенаведені розрахунки велись на сухі сировинні матеріали. Звичайно на практиці при складанні сировинних сумішей необхідно враховувати вологість матеріалів, змінюючи відповідним чином їх дозування. В такому випадку вміст кожного компонента для одержання заданої кількості сировинної суміші встановлюють за формулою:

$$x = \frac{AP}{100 - w},$$

де x - дозування вологого компонента, %;

A - задана кількість сировинної суміші, кг;

P - дозування сухого компонента, %;

w - вологість, даного компонента, %.

Список літератури

1. Рунова Р.Ф., Дворкін Л.Й., Дворкін О.Л., Носовський Ю.Л. В'язучі речовини: Підручник. – К.: Основа, 2012. – 448 с.
2. Бутт Ю.М., Тимашев В.В. Практикум по химической технологии вяжущих материалов: Учебное пособие для химико-технологических специальностей вузов. М.. Высшая школа, 1973. - 504с.
3. Волженский А.В. Минеральные вяжущие вещества. Учебник - 4-е изд. М.: Стройиздат, 1986. - 464 с.
4. Пащенко А.А., Сербии В.П., Старчевская К.А. Вяжущие материалы. К.: Вища школа, 1975. - 444 с.
5. Пащенко А.А. и др. Теория цемента. - К.: Будівельник, 1991. - 168 с.

Навчально-методичне видання

РОЗРАХУНКИ СКЛАДУ СИРОВИННИХ СУМІШЕЙ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ В'ЯЖУЧИХ РЕЧОВИН

Методичні рекомендації

до виконання курсового проекту з дисципліни «В'яжучі речовини»
для студентів спеціальності 192 «Будівництво і цивільна інженерія»
спеціалізації 192.04 «Технологія будівельних конструкцій, виробів і
матеріалів»

Укладачі: Рунова Раїса Федорівна,
Троян В'ячеслав Володимирович,
Майстренко Алла Анатоліївна,
Константиновський Олександр Петрович,
Рогозіна Наталія Володимирівна

Комп'ютерне верстання

Підписано до друку

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ
Київський національний університет будівництва і архітектури

РОЗРАХУНКИ СКЛАДУ СИРОВИННИХ СУМІШЕЙ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ В'ЯЖУЧИХ РЕЧОВИН

Методичні рекомендації

до виконання курсового проекту з дисципліни «В'язучі речовини»
для студентів спеціальності 192 «Будівництво і цивільна інженерія»
спеціалізації 192.04 «Технологія будівельних конструкцій, виробів і
матеріалів»

Усі цитати, цифровий
та фактичний матеріал,
бібліографічні відомості
перевірено. Написання
одиниць вимірювання
відповідає стандартам

Підпис (и) автора (ів) _____

" _____ " _____ 2020 р.

Підпис голови методичної комісії спеціальності

" _____ " _____ 2020 р.

Київ 2020