

УДК 691.3:620.197.6

## ГІДРАТАЦІЯ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТУ В ПРИСУТНОСТІ ДОБАВКИ ВИСОКОДИСПЕРСНОЇ КРЕЙДИ

Канд. техн. наук О. С. Борзяк, асп. С. М. Чепурна

## ГИДРАТАЦИЯ ПОРТЛАНДЦЕМЕНТА В ПРИСУТСТВИИ ДОБАВКИ ВЫСОКОДИСПЕРСНОГО МЕЛА

Канд. техн. наук О. С. Борзяк, асп. С. Н. Чепурная

## HYDRATION OF PORTLAND CEMENT WITH THE ADDITION OF HIGHLY DISPERSED CHALK

PhD techn. O. S. Borziak, pg. S. M. Chepurna

---

DOI: 10.18664/1994-7852.175.2018.127256

---

*У роботі досліджено вплив добавки високодисперсної крейди на процеси гідратації портландцементу. Можливість протікання реакцій взаємодії підтверджується термодинамічними розрахунками. Розраховано кількість карбонату кальцію, що використовується для створення представлених сполук з урахуванням мінерального складу цементу, ступеня гідратації клінкерних мінералів, ступеня засвоєння гіпсу.*

**Ключові слова:** високодисперсна крейда, гідрокарбоалюмінат кальцію, портландцемент, термодинамічні розрахунки.

*В работе исследовано влияние добавки высокодисперсного мела на процессы гидратации портландцемента. Возможность протекания реакций взаимодействия подтверждается термодинамическими расчетами. Рассчитано количество карбоната кальция, используемого для создания представленных соединений с учетом минерального состава цемента, степени гидратации клинкерных минералов, степени усвоения гипса.*

**Ключевые слова:** высокодисперсный мел, гидрокарбоалюминат кальция, портландцемент, термодинамические расчеты.

*The effect of the addition of highly disperse chalk on the hydration processes of Portland cement has been studied. The possibility of interaction reactions is confirmed by thermodynamic calculations. Calculated the amount of calcium carbonate used to create the presented compounds, taking into account the mineral composition of cement, the degree of hydration of clinker minerals, the degree of assimilation of gypsum.*

**Key words:** highly dispersed chalk, calcium hydrogen carbonate, Portland cement, thermodynamic calculations.

**Вступ.** Одним із пріоритетних напрямів розвитку сучасного матеріалознавства є розроблення нових типів цементів і на їх основі бетонів, що забезпечуватимуть високі експлуатаційні та технологічні властивості конструкцій протягом

тривалого періоду. Тому останнім часом велика увага приділяється виробництву нових композиційних в'язучих, які мають поліпшені фізико-механічні характеристики (міцність на стиск і вигин, водонепроникність, хімічна стійкість,

морозостійкість тощо, що збільшують показники довговічності конструкцій будинків і споруд), низьку енергоємність і при виробництві яких вирішуються питання охорони навколишнього середовища.

Використання добавок різного складу дозволяє знизити кількість клінкерного цементу, підвищити щільність структури і, як наслідок, міцність, довговічність і стійкість бетонів в агресивному середовищі. У якості природних добавок досить часто використовують карбонатні породи, проте в Україні використовується практично тільки вапняк-черепашник, а така карбонатна порода, як крейда, взагалі не використовується. Використання крейди ускладнене її основними властивостями: підвищеною липкістю, гідрофільністю, високою питомою поверхнею. Однак досить об'ємні запаси крейди з високим вмістом карбонату кальцію, який здатний брати участь у структуроутворенні цементного композита і бетону, а також слабка цементация частинок з високою питомою поверхнею створюють передумови для використання меленої крейди в якості заповнювачів для бетонних сумішей і бетонів.

**Аналіз досліджень і публікацій.** При введенні до складу бетону карбонатних мікронаповнювачів між цими частинками та продуктами гідратації цементу відбувається взаємодія. Ця взаємодія розглядається різними науковими школами неоднозначно. За роботою [1] карбонатні наповнювачі обумовлюють епітаксіальне зрощення, найбільш інтенсивне в разі наявності хімічної спорідненості як по катіону, так і по аніону. Експериментально встановлено, що міцність на відрив цементного каменю найменша з кварцовими пісками, а найбільша з карбонатними породами. У роботі [2] формування міцної контактної зони пояснюється самоущільненням за рахунок хімічної взаємодії між карбонатним заповнювачем і продуктами гідратації

цементу. Контактна зона – це самостійний елемент структури бетону, який відіграє істотну роль у підвищенні міцності, водонепроникності, морозостійкості, хімічної стійкості бетону. Тому є необхідність розглянути процеси, що відбуваються на контакті мікронаповнювача – високодисперсної крейди – і цементного каменю.

Основу міцності цементного каменю [3] становлять електрогетерогенні контакти, що виникають між кристалами з позитивно зарядженими поверхнями гідроксиду кальцію, гідроалюмінатів, гідроферитів, а також гідросилікатів, що мають негативний поверхневий заряд.

Існують різні способи підвищення вмісту електрогетерогенних контактів у дисперсних системах: перезарядження дисперсних частинок системи за допомогою постійного електричного струму, підвищення тонкості помелу в'язучого з його подальшим перезарядженням, введення в цементно-піщані суміші порошоків з позитивно зарядженими дисперсними частинками [4, 5]. Найбільш доступним з перерахованих способів створення електрогетерогенних контактів у цементно-піщаних сумішах є введення в ці суміші позитивно заряджених мінеральних частинок високого ступеня дисперсності.

Процеси твердіння мінеральних в'язучих у присутності мінеральних добавок обумовлені одночасно і гідрато- і структуроутворенням. Це пов'язано з тим, що темпи твердіння різних фаз клінкерного в'язучого та їх взаємодії з частинками добавок істотно відрізняються.

Крейда – це речовина зі змішаними структурними зв'язками, основна частина якої представлена на 95–98 % карбонатом кальцію і незначною кількістю глинистих домішок.

При гідратації алюмоутворюючих клінкерних мінералів  $C_3A$  і  $C_4AF$  в присутності карбонату кальцію відбувається зміна фазового складу новоутворень, що веде до зміни фізико-

механічних властивостей цементних композитів [6, 7].

Було встановлено, що утворення гідрокарбоалюмінату кальцію на поверхні карбонатних наповнювачів сприяє інтенсифікації процесу твердіння за рахунок алюмомісних клінкерних мінералів, при цьому з поверхнею карбонатних зерен утворюється міцний кристалічний конгломерат з гексагональними кристалами гідрокарбоалюмінату кальцію [2, 8, 9].

У процесі гідратації карбонат кальцію вступає в хімічну взаємодію з алюмоутворюючими клінкерними мінералами  $C_3A$  і  $C_4AF$  з утворенням кубічного гідроалюмінату кальцію  $3CaO \times Al_2O_3 \times 6H_2O$  і комплексної сполуки гідракарбоалюмінату кальцію (ГКАК)  $C_3A \times CaCO_3 \times 11H_2O$  за умови, що крейда представлена зернами  $d < 42$  мкм [8-10]. При більш крупних зернах карбонату кальцію утворюється невелика кількість кубічного  $C_3AH_6$  [11].

Гідрокарбоалюмінати кальцію зростаються між собою і поверхнею карбонату кальцію в щільний кристалічний конгломерат, можуть служити «зародками кристалізації» і гарною епітаксичною підкладкою для утворення нових сполук [12].

За даними різних авторів [8, 9] при гідратації  $C_3S$  і  $C_2S$  в присутності карбонату кальцію утворюється незначна частина скоутиту ( $6CaO \times SiO_2 \times CaCO_3 \times nH_2O$ ).

У присутності карбонату кальцію спостерігається прискорення процесу гідратації клінкерних частинок цементного композита, при цьому збільшується водоцементне відношення в системі та відбувається відведення продуктів розчинення з зони реакції до поверхності частинок крейди [11].

У системі  $C_3A \times CaCO_3 \times 11H_2O$  –  $C_3A \times Ca(OH)_2 \times 11H_2O$ , крім ГКАК [13], виявили утворення неперервного ряду твердих розчинів, а саме стійко ідентифікуються сполуки

$3CaO \times Al_2O_3 \times 0,25CaCO_3 \times 0,75Ca(OH)_2 \times 12H_2O$ , і відзначено можливість утворення  $C_3A \times 3CaCO_3 \times (30 \div 32)H_2O$ .

Моногідракарбоалюмінат і гексагональні гідроалюмінати кальцію виявляються в структурі цементного каменю і бетону, що довгий час тверділи при нормальних умовах. При пропарюванні можливе розкладання моногідракарбоалюмінату кальцію на  $C_3AH_6$  і  $CaCO_3$ . У гелеподібній складовій цементного каменю, що затвердів, можливе утворення фаз досить складного складу, а саме томаситу  $\{Ca_3[Si(OH)_6] \times 12H_2O\} \times (SO_4) \times (CO_3)$  [2].

У контактній зоні карбонату кальцію з гідратними фазами цементного каменю утворюється перехідна зона з дрібних кристалів довільної орієнтації, у межах яких утворюється твердий розчин зі складом, що безперервно змінюється [8, 9, 14].

При замішуванні цементної суміші з карбонатом кальцію молекули води поступово активують поверхневі шари  $CaCO_3$  і сприяють дифузії іонів  $Ca^{2+}$ ,  $OH^-$ ,  $CO_3^{3-}$  в структурі крейди. У результаті цього процесу на пізніх термінах твердіння цементу утворюються ізоморфні зв'язки між  $Ca(OH)_2$  і  $CaCO_3$ , що зміцнює структуроутворюючі зв'язки в системі «цемент – наповнювач – вода» [15].

Підвищену міцність цементного каменю в присутності карбонату кальцію показали зразки не тільки з  $C_3A$ , що пов'язано з утворенням гідрокарбоалюмінату кальцію, але й з  $C_3S$ , що, на думку Е. Р. Пінуса [16], пов'язано з кристалохімічною взаємодією  $CaCO_3$  і  $C_3S$ , а також з утворенням великої кількості зростків кристалів гідратних новоутворень внаслідок їх хімічної спорідненості та близькості параметрів кристалічних решіток. Шари кальцію на поверхні заповнювача ущільнюються і зміцнюються контактні зони в'язучого.

О. Г. Ольгінський у своїх працях [6] зазначав, що зерна карбонату кальцію

мають водовідсмоктувальну спроможність, забирають воду з цементного тіста, у результаті чого цементне тісто ущільнюється на контакті з заповнювачем.

Дані, які отримала З. М. Ларіонова [17], показали, що цементний камінь з карбонатом кальцію разом з кристалічним гідрокарбоалюмінатом кальцію містить значну кількість гелеподібної маси, найбільш щільні накопичення яких спостерігаються навколо остаточних клінкерних зерен, і гідрокарбоферити на контакті з карбонатом кальцію.

Результати аналізу цементних композицій з крейдою, отримані Н. О. Копаніца, Л. А. Анікановою [18], показали повну відсутність портландиту і появу нових сполук гідрокарбонатів кальцію й алюмінію, крім того, тонкодисперсний карбонат кальцію в цементних композиціях виступає в ролі гарної основи для кристалізації сполук.

Дослідження, проведені М. І. Стрелковим, М. С. Золотовим, Т. В. Жидковою [19], свідчать, що цементні композиції, до складу яких входять карбонати лужних металів і карбонату кальцію, утворюють комплексні сполуки – гідрокарбонати, що сприяє підвищенню морозостійкості та сульфатостійкості бетону.

Прискорення процесу гідратації аліту в присутності високодисперсної крейди, на нашу думку, пов'язано з тим, що додаткові центри кристалізації сприяють відведенню

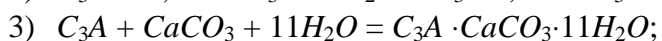
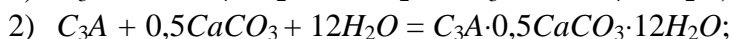
первинних гідратів за межі плівки новоутворень і кристалізації портландиту  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  з перенасиченого розчину на поверхню зерен кальциту. При цьому знижується щільність плівок новоутворень, що веде до збільшення швидкості дифузії води до поверхні зерен аліту і, як наслідок, до підвищення ступеня його гідратації. Крейда вступає у взаємодію з алюмоутворюючими фазами портландцементу клінкеру і має підвищену адсорбційну здатність. У результаті на поверхні зерен кальциту можуть бути присутні сполуки типу гідрокарбоалюмінатів кальцію [2, 6, 7].

**Мета та завдання досліджень.** Мета досліджень – визначення впливу добавки високодисперсної крейди на процеси гідратації портландцементу.

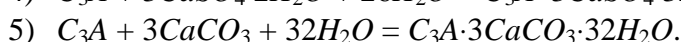
Завдання досліджень – за допомогою термодинамічних розрахунків встановити вірогідність протікання реакцій між мінералами портландцементу і добавкою високодисперсної крейди; розрахувати допустиму кількість добавки високодисперсної крейди, враховуючи мінеральний склад портландцементу.

**Основна частина досліджень.** Імовірні реакції в системі клінкерні мінерали – карбонатні мінеральні добавки, продуктами яких можуть бути кристалічні фази, які збільшують сумарний об'єм твердої фази за рахунок хімічного зв'язування значної кількості води, і характеризуються знаком «+» поверхневого заряду [3]:

- гідратації  $C_3A$  в присутності кальцієвих солей з утворенням  $AFm$ -фаз:



- гідратації  $C_3A$  в присутності кальцієвих солей з утворенням  $AFt$ -фаз:



Можливість протікання наведених хімічних реакцій визначається величиною їх вільної енергії Гіббса.

Вільна енергія Гіббса реакцій вигляду  $aA + bB = cC + dD$ , де  $A, B, C, D$  – речовини, що беруть участь у реакції (іони),  $a, b, c, d$  –

їхні стехіометричні коефіцієнти, за роботою [14], дорівнює

$$\Delta G = c\Delta G_C + d\Delta G_D - (a\Delta G_A + b\Delta G_B), \quad (1)$$

де  $\Delta G_A, \Delta G_B, \Delta G_C, \Delta G_D$  – вільна енергія Гіббса утворення речовин (іонів)  $A, B, C, D$  з елементів.

Вільна енергія Гіббса наведених реакцій складає:

- 1)  $\Delta G = -7778,5 - (-3382,3) - (-1797,8) - 10 \times (-237,2) = -226,4$  кДж/моль;
- 2)  $\Delta G = -7336 - (-3382,3) - 0,5 \times (-1129,2) - 12 \times (-237,2) = -542,7$  кДж/моль;
- 3)  $\Delta G = -7337,5 - (-3382,3) - (-1129,2) - 11 \times (-237,2) = -216,8$  кДж/моль;
- 4)  $\Delta G = -15205,9 - (-3382,3) - 3 \times (-1798,7) - 26 \times (-237,2) = -260,3$  кДж/моль;
- 5)  $\Delta G = -14567,7 - (-3382,3) - 3 \times (-1129,2) - 32 \times (-237,2) = -206,44$  кДж/моль.

Вільна енергія Гіббса утворення речовин, що беруть участь у гідратації портландцементу з карбонатними добавками із елементів, прийнята за роботами [20, 21].

Оскільки в цементі міститься гіпс, карбонатвмісна добавка не вступає в реакцію з  $C_3A$  і  $C_4AF$  до тих пір, поки гіпс не зв'яжеться у важкорозчинний гідросульфатоалюмінат кальцію. Реакція можлива, якщо після утворення гідросульфатоалюмінату кальцію залишаються  $C_3A$  і  $C_4AF$ , що не прореагували з сульфат-іонами.

Для визначення кількості карбонату кальцію, що використовується для створення представлених сполук, можна використати формулу, що запропонована у роботі [19].

При проведенні розрахунків були прийняті такі умовні літерні позначення:

$x$  – ступінь гідратації клінкерних мінералів ( $x_1$  -  $C_3A$ ,  $x_2$  -  $C_4AF$ ,  $x_3$  -  $C_3S$ ,  $x_4$  -  $C_2S$ ) до розрахункового терміну твердіння;

$x_5$  – ступінь засвоєння гіпсу;

$z$  – співвідношення молярної маси компонентів;

$y$  – коефіцієнт, що враховує зниження кількості кристалічної фази, що представлена трьома сполуками ( $y_1$  -  $3CaO \times Al_2O_3$ ,  $y_2$  -  $3CaO \times Fe_2O_3$ ;  $y_3$  -  $Ca(OH)_2$ );

$k$  – мінералогічний склад цементу.

$$z_1 = \frac{CaCO_3}{3CaO \times Al_2O_3} = 0,37; \quad (2)$$

$$z_2 = \frac{CaCO_3}{3CaO \times Fe_2O_3} = 0,30; \quad (3)$$

$$z_3 = \frac{CaCO_3}{Ca(OH)_2} = 1,35; \quad (4)$$

$$z_4 = \frac{3CaO \times Al_2O_3}{CaSO_4 \times H_2O} = 1,57; \quad (5)$$

$$z_5 = \frac{3CaO \times Fe_2O_3}{3CaO \times Al_2O_3 \times Fe_2O_3} = 0,76; \quad (6)$$

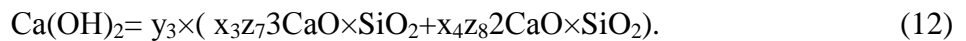
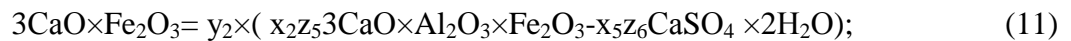
$$z_6 = \frac{3CaO \times Al_2O_3}{CaSO_4 \times H_2O} = 1,91; \quad (7)$$

$$z_7 = \frac{Ca(OH)_2}{3CaO \times SiO_2} = 0,32; \quad (8)$$

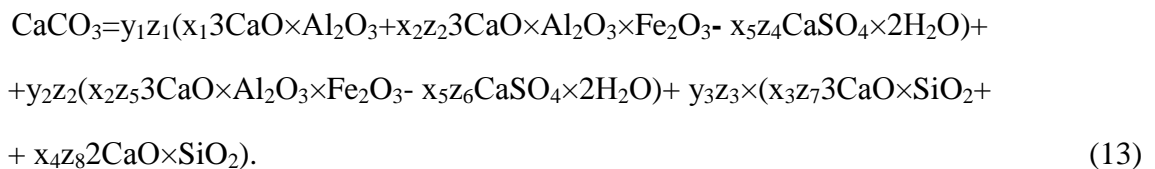
$$z_8 = \frac{Ca(OH)_2}{2CaO \times SiO_2} = 0,43. \quad (9)$$

Кількість компонентів клінкеру, що здатні зв'язувати карбонат кальцію, розраховують так:

$$3CaO \times Al_2O_3 = y_1 \times (x_1 z_1 3CaO \times Al_2O_3 + x_2 z_2 3CaO \times Al_2O_3 \times Fe_2O_3 - x_5 z_4 CaSO_4 \times 2H_2O); \quad (10)$$



Відсоток карбонату кальцію у складі цементного каменю становить



Коефіцієнти  $y_1$  і  $y_2$ ,  $x_5$  дорівнюють 1,  $y_3=0,3$ , тому що високодисперсна крейда має розмір зерен менше 10 мкм, коефіцієнт  $z$  – величина постійна. Ступінь гідратації у

віці 28 діб становить  $x_1=0,84$ ;  $x_2=0,74$ ;  $x_3=0,69$ ;  $x_4=0,11$ .

Підставивши значення у формулу (13), отримуємо:

- для ПЦ І-400

$$\begin{aligned} \text{CaCO}_3 = & 1 \times 0,37(0,84 \times 6,2 + 0,74 \times 0,3 \times 13,8 - 1 \times 1,57 \times 0,3) + 1 \times 0,3(0,74 \times 0,76 \times 13,8 - \\ & - 1 \times 1,91 \times 0,3) + 0,3 \times 1,35(0,69 \times 0,32 \times 60,7 + 0,11 \times 0,48 \times 16,5) = 15,8; \end{aligned} \quad (14)$$

- для ПЦ І-500 Н

$$\begin{aligned} \text{CaCO}_3 = & 1 \times 0,37(0,84 \times 6,0 + 0,74 \times 0,3 \times 12,5 - 1 \times 1,57 \times 0,3) + 1 \times 0,3(0,74 \times 0,76 \times 12,5 - \\ & - 1 \times 1,91 \times 0,3) + 0,3 \times 1,35(0,69 \times 0,32 \times 63,7 + 0,11 \times 0,48 \times 14,8) = 10,7. \end{aligned} \quad (15)$$

Процес взаємодії карбонату кальцію з продуктами гідратації відбувається на поверхні зерен кальциту, тому кількість добавки карбонату кальцію в структурі бетону має бути більше, ніж розрахункова кількість. При цьому кількість новоутворень у цементному камені збільшується на величину, що відповідає кількості зв'язаного карбонату кальцію.

**Висновки.** За теоретичними передумовами, при гідратації алюмомісних клінкерних мінералів  $\text{C}_3\text{A}$  і  $\text{C}_4\text{AF}$  в присутності карбонату кальцію відбувається зміна фазового складу новоутворень, які представлені гідроалюмінатом кальцію  $3\text{CaO} \times \text{Al}_2\text{O}_3 \times 6\text{H}_2\text{O}$  і комплексною сполукою гідракарбоалюмінату кальцію (ГКАК)  $\text{C}_3\text{A} \times \text{CaCO}_3 \times 11\text{H}_2\text{O}$ .

У результаті аналізу хімічних реакцій і величин їх вільної енергії Гіббса  $\Delta G$  встановлено: у присутності мінеральних добавок можливі всі реакції гідратації трикальцієвого алюмінату  $\text{C}_3\text{A}$  з утворенням кристалогідратів гідросульфо-, гідрокарбоалюмінатів кальцію –  $\text{AFm}$  та  $\text{AFt}$ -фаз; величина вільної енергії Гіббса  $\Delta G$  реакцій припадає на 1 моль  $\text{C}_3\text{A}$ , її величина для однакових умов характеризує перевагу наведених реакцій; реакції взаємодії  $\text{C}_3\text{A}$  з карбонатом кальцію з утворенням  $\text{AFm}$  та  $\text{AFt}$ -фаз за наявності реагуючих компонентів є термодинамічно незворотними.

Оскільки в цементі міститься гіпс, карбонатвмісна добавка не вступає в реакцію з  $\text{C}_3\text{A}$  і  $\text{C}_4\text{AF}$  до тих пір, поки гіпс не зв'яжеться у важкорозчинний гідросульфоалюмінат кальцію. Розраховано

кількість карбонату кальцію, що використовується для створення представлених сполук з урахуванням мінерального складу цементу, ступеня

гідратації клінкерних мінералів, ступеня засвоєння гіпсу. Для ПЦ І-400 кількість карбонатних домішок становить 15,8 %, для ПЦ І-500 Н – 10,7 %.

### Список використаних джерел

1. Вознесенский, В. А. Оптимизация состава многокомпонентных добавок в композиты [Текст] / В. А. Вознесенский. – К. : Знание, 1981. – 201 с.
2. Тимашев, В. В. Свойства цемента с карбонатными добавками [Текст] / В. В. Тимашев, В. М. Колбасов // Цемент. – 1981. – № 10. – С. 10–12.
3. Основы теории твердения, прочности, разрушения и долговечности портландцемента, бетона и конструкций из них [Текст] : монография в 3-х т. / А. Н. Плугин, А. А. Плугин, Л. В. Трикоз [и др.]; под ред. А. Н. Плугина. – К. : Наукова думка, 2012. – Т. 1. – 336 с. Т. 2. – 223. Т. 3. – 287 с.
4. Коллоидно-химические аспекты повышения активности цемента для получения ячеистых и плотных бетонов и растворов без тепловой обработки [Текст] / В. И. Бабушкин, Е. В. Кондращенко, Т. А. Костюк, В. И. Момот // Цемент Украины. – 1997. – № 2. – С. 25–30.
5. Гидратация цемента, активированного током высокого напряжения [Текст] / В. И. Бабушкин, В. А. Матвиенко [и др.] // Известия вузов. Сер. Строительство. – 1993. – № 2. – С. 47–50.
6. Ольгинский, А. Г. Особенности контактообразования в цементных бетонах с минеральными микронаполнителями [Текст] / А. Г. Ольгинский // Вісник ДонДАБА. – 2004. – Вип. 1 (43), Т. 1. – С. 134–140.
7. Мирюк, О. А. Гидратообразование алюминатного цемента долгосрочного твердения [Текст] / О. А. Мирюк // Бетон и железобетон в Украине. – 2011. – № 4 (62). – С. 8–11.
8. Будников, П. П. К вопросу о роли высокодисперсных карбонатных добавок в формировании структуры и состава новообразований, возникающих в гидратирующем цементном камне [Текст] / П. П. Будников, В. М. Колбасов // Труды VI совещания по экспериментальной и технической минералогии и петрографии АН СССР. – 1962. – С. 189–196.
9. Бенштейн, Ю. И. Кристаллизация гидратных новообразований цементного камня на карбонатной подложке [Текст] / Ю. И. Бенштейн // Труды МХТИ им. Д.И. Менделеева. – М. : МГУ, 1974. – Вып. 68. – С. 16–22.
10. Самченко, С. В. Карбонизация гидратных составляющих портландцемента, алюминатного и сульфоалюминатного цементов [Текст] / С. В. Самченко, Е. М. Макаров // Техника и технология силикатов. – 2013. – № 3. – С. 27–29.
11. Matschei T. The Role of Calcium Carbonate in Cement Hydration [Text] / T. Matschei, V. Lothenbach and F. P. Glasser // Elsevier Magazine: Cement and Concrete Research. – 2007. – Vol. 7. – No. 4. – P. 551–558.
12. Effectiveness of using CO<sub>2</sub> pressure to enhance the carbonation of Portland cement-fly ash-MgO mortars [Text] / [Liwu Mo, Feng Zhang, Min Deng, Daman K. Panesar] // Cement and Concrete Composites. – 2016. – Vol. 70. – P. 78–85.
13. Тимашев, В. В. Цементы с микронаполнителями [Текст] / В. В. Тимашев // Технология вяжущих веществ. – М. : Высшая школа, 1965. – 596 с.
14. Бабушкин, В. И. Термодинамика силикатов [Текст] / В. И. Бабушкин, Г. М. Матвеев, О. П. Мчедлов-Петросян; под ред. О. П. Мчедлова-Петросяна. – М. : Стройиздат, 1986. – 108 с.

15. Influence of superplasticizer type and mix design parameters on the performance of them in concrete mixtures [Text] / [Papayianni I, Tsohos G, Oikonomou N, Mavria P.] // *Cement and Concrete Composites*. – 2005. – Vol. 27. – № 2. – P. 217–222.
16. Любимова, Т. Ю. О свойствах контактной зоны на границе между вяжущим и заполнителем в бетоне [Текст] / Т. Ю. Любимова, Э. Р. Пинус // *Тр. НИИЖБ*. – М. : Госстройиздат, 1962. – Вып. 28. – С. 196–211.
17. Ларионова, З. М. Фазовый состав, микроструктура и прочность цементного камня и бетона [Текст] / З. М. Ларионова, Л. В. Никитина, В. Р. Гарашин. – М. : Стройиздат, 1977. – 264 с.
18. Копаница, Н. О. Тонкодисперсные добавки для наполненных вяжущих на основе цемента [Текст] / Н. О. Копаница, Л. А. Аниканова, М. С. Макаревич // *Строительные материалы*. – 2002. – № 9. – С. 2–3.
19. Стрелков, М. И. Снижение расхода цемента в бетоне за счет применения карбонатных добавок [Текст] / М. И. Стрелков, М. С. Золотов, Т. В. Жидкова // *Физико-химические проблемы материаловедения и новые технологии. Технология бетона и железобетона*. – Белгород, 1991. – С. 42–43.
20. Matschei T. Thermodynamic properties of Portland cement hydrates in the system  $CaO-Al_2O_3-SiO_2-CaSO_4-CaCO_3-H_2O$  [Text] / T. Matschei, B. Lothenbach, F.P. Glasser // *Cement and Concrete Research*. – 2007. – № 37. – P. 1379-1410.
21. Impact of chloride on the mineralogy of hydrated Portland cement systems [Text] / [M. Balonis, B. Lothenbach, G. Le Saout, F.P. Glasser] // *Cement and Concrete Research*. – 2010. – № 40(7). – P. 1009-1022.

---

Борзяк Ольга Сергіївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. +380577301063. E-mail: borziak.olga@gmail.com.

Чепурна Світлана Миколаївна, аспірант, асистент кафедри міського будівництва Харківського національного університету міського господарства ім. О.М. Бекетова. Тел. +380936718436. E-mail: s.chepurna0274@gmail.com.

Borziak Olga S., PhD, associate professor Building Materials and Structures Department, Ukrainian State University of Railway Transport. Ph. +38057)7301063. E-mail: borziak.olga@gmail.com.

Chepurna Svitlana M., graduate student, assistant of the Department of Urban Development. O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. Ph. +380936718436. E-mail: s.chepurna0274@gmail.com.

Статтю прийнято 15.02.2018 р.