

УДК 691

DOI: 10.30838/UJCEA.2312.301024.66.1094.1

ФОРМУВАННЯ ГІДРАТНИХ СПОЛУК СИСТЕМИ $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ЗА ГІДРАТАЦІЇ МІНЕРАЛІВ АЛЮМІНАТНИХ ЦЕМЕНТІВ

ДЕРЕВ'ЯНКО В. М.¹, докт. техн. наук, проф.,

ГРИШКО Г. М.^{2*}, канд. техн. наук, доц.,

ДУБОВ Т. М.³, канд. техн. наук, доц.

¹ Кафедра технології будівельних матеріалів, виробів та конструкцій, Український державний університет науки і технологій, ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова, 24-а, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-16-22, e-mail: viktorderevianko2017@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9733-9558

^{2*} Кафедра цивільної інженерії, технологій будівництва і захисту довкілля, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, вул. Сергія Єфремова, 25, 49600, Дніпро, Україна, e-mail: hryshko.hanna@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0009-0002-3872-6555

³ Кафедра цивільної інженерії, технологій будівництва і захисту довкілля, Дніпровський державний аграрно-економічний університет, вул. Сергія Єфремова, 25, 49600, Дніпро, Україна, e-mail: dubov.t.m@dsau.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-1740-9251

Анотація. *Постановка проблеми.* Використання добавок-модифікаторів та дослідження їх впливу на термодинамічну і гідродинамічну стабільність структури твердіння еtringіту $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$ сприятиме підвищенню водостійкості, поліпшенню технологічних факторів, що, у свою чергу сприятиме розширенню сфери застосування композитів на їх основі. Регулюючи водотверде відношення, можна керувати властивостями вихідного композиту: отримувати необхідну структуру та водостійкість. Дослідження впливу добавок на композити системи $\text{CaO}\text{--}\text{Al}_2\text{O}_3\text{--}\text{SO}_3\text{--}\text{H}_2\text{O}$ та наступне розроблення їх складів дасть можливість керувати процесами гідратації, формувати високоосновний еtringіт, кількість хімічно зв'язаної води в якому досягає 46 %. **Мета** – дослідження щодо розроблення еtringітової фази на основі алюмінатних цементів. **Висновки.** Стабілізацію еtringіту композиту оптимального складу – 70 % глиноземистого цементу та 30 % гіпсу – визначали за результатами топонімічних реакцій переходу системи з макро- в мікро- та наносистему зі зміною часу, проводячи рентгенофазовий аналіз через 3, 7, 14 та 28 діб. За вибраною методикою досліджень відбувалася модифікація напівводного гіпсу глиноземистим цементом. Експериментальним шляхом встановлено оптимальну кількість модифікатора – 70 % глиноземистого цементу, яка необхідна для підвищення фізико-механічних властивостей, а також формування необхідного мінералогічного складу модифікованого в'язучого. За гідратації модифікованих в'язучих речовин на основі глиноземистого цементу та гіпсу відбувається утворення еtringіту, який дав можливість сформувати необхідну структуру та основні фізико-механічні властивості.

Ключові слова: композиційне в'язуче; модифікація; добавка; еtringіт; стабілізація еtringітової фази; алюмінатні цементи; сульфоалюмінатні цементи

FORMING HYDRATE COMPOUNDS SYSTEM $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$ DURING THE ALUMINATE CEMENT MINERALS HYDRATION

DEREVIANKO V.M.¹, Dr. Sc. (Tech.), Prof.,

HRYSKO H.M.^{2*}, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.,

DUBOV T.M.³, Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.

¹ Department of Technology of Construction Materials, Products and Designs, Ukrainian State University of Science and Technologies, ESI "Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture", 24-a, Architect Oleh Petrov Str., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-16-22, e-mail: viktorderevianko2017@gmail.com, ORCID ID: 0000-0002-9733-9558

^{2*} Department of Civil Engineering, Construction Technologies and Environmental Protection, Dnipro State Agrarian-Economic University, 25, Serhii Efremov St., Dnipro, 49600, Ukraine, e-mail: hryshko.hanna@pdaba.edu.ua, ORCID ID: 0009-0002-3872-6555

³ Department of Civil Engineering, Construction Technologies and Environmental Protection, Dnipro State Agrarian-Economic University, 25, Serhii Efremov St., Dnipro, 49600, Ukraine, e-mail: dubov.t.m@dsau.dp.ua, ORCID ID: 0000-0003-1740-9251

Abstract. Problem Statement. The use of modifying additives and research of their influence on the thermodynamic and hydrodynamic stability of the solidification structure of $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ettringite will lead to an increase in water resistance, improvement of technological factors, which in turn will contribute to the expansion of the scope of application of composites based on such additives. By means of adjusting the water-solid ratio, you can control properties of the initial composite: you can obtain the necessary structure and water resistance. Research of the effect caused by additives on the composites of the $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SO}_3-\text{H}_2\text{O}$ system and the subsequent development of their compositions will provide an opportunity to control the hydration processes, form highly basic ettringite with the amount of chemically bound water in it reaching 46 %. **Purpose of the article** – to conduct a research on modification of the ettringite phase aimed at increasing its stability. **Conclusions.** Stabilization of ettringite composite of optimal composition (70 % of alumina cement and 30 % of gypsum) was determined based on the results of toponymic reactions of transition of the system from the macro-system to the micro- and nanosystem when changing time, by conducting X-ray phase analysis after 3, 7, 14 and 28 days. According to the selected research methodology, semi-aqueous gypsum was modified with alumina cement. Experimentally determined was optimal amount of the modifier (70 % of alumina cement) which is necessary to increase physical and mechanical properties, as well as to form necessary mineralogical composition of the modified binder. During hydration of modified binders based on alumina cement and gypsum, formation of ettringite occurs, which makes it possible to form the necessary structure and basic physical and mechanical properties.

Keywords: composite binder; modification; additive; ettringite; ettringite phase stabilization; aluminate cements; sulfoaluminate cements

Актуальність проблеми. Проведений аналіз результатів досліджень у галузі бетонознавства підтверджує, що необхідністю сьогодення стало створення цементної матриці з регулюванням процесів структуроутворення на макро-мікро- та нанорівнях, що дозволить одержати нові за складом та структурою будівельні матеріали з поліпшеними міцносними характеристиками.

Основні пошукові роботи під час розроблення таких цементів здійснюються у напрямку створення нових композицій із заміною дефіцитних компонентів. За такого речовинного складу вартість таких цементів незначно перевищує рядові, але їх властивості дозволяють заміну сульфоалюмінатних цементів у будівництві.

Узагальнивши нагромаджений досвід, зазначаємо, що нові ефективні сульфоалюмінатні композиції можна отримати на основі гіпсу та відходів виробництва. Модифікування сульфатів кальцію дасть змогу цілеспрямовано регулювати швидкість його гідратації та узгодити в часі структуроутворення цементного каменю.

Дослідження направлені на створення сульфоалюмінатних та алюмінатних в'язучих речовин на основі композицій глиноземистого цементу та гіпсу, а виробництво розчинів на їх основі бачиться актуальним.

Мета роботи – провести дослідження щодо розроблення еtringітової фази на основі алюмінатних цементів.

Аналіз літератури. Алюмінатний і сульфоалюмінатний клінкери – полімінеральні та полікристалічні продукти.

Вивчення взаємодії алюмінатів кальцію з гіпсом за температурі 1 200 °C проводилися в роботі [1], в результаті досліджень встановлено, що в процесі високотемпературних взаємодій утворюється сполука $n\text{Ca}\cdot\text{SO}_4$, де n коливається в межах 1,6–3,6.

Вміст кристалізаційної води в еtringіті ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$) змінюється залежно від зміни умов навколишнього середовища. У процесі нагрівання еtringіт стабільний до 65 °C, у вологих умовах – до 93 °C. Зміна вмісту кристалізаційної води відбувається в межах 10–12 %.

У праці [2] детально вивчено процес дегідратації еtringіту і роль води в його структурі. Швидкість утворення еtringіту підвищується зі збільшенням основності алюмінату кальцію [2].

За даними досліджень [3], через одну добу спостерігається повне зв'язування гіпсу за гідратації C_3A з гіпсом, при зв'язуванні C_4A – 3 доби, а C_2A – 28 діб твердіння у воді. Встановлено, що морфологія кристалів ГСАК залежить від складу вихідного алюмінату кальцію. ГСАК, який одержали із C_3A , має вигляд тонких

голок із нормальним показником світлопереломлення, із СА – пластинок, із C_5A_3 – товстих брусків [3].

Вивчаючи структуру системи $CaO-Al_2O_3$, відмічаємо вплив води на рівновагу даної системи. Між C_3A та СА в умовах сухої атмосфери утворюється евтектика, за звичної вологості з'являється склад проміжний між $C_{12}A_7$ і $C_{12}A_7H$, який за температури $1392^\circ C$ плавиться в однорідну рідину з виділенням пари води. Це пояснюється тим, що координація іонів Ca^{2+} нерегулярна [4].

Співвідношення різних форм еtringіту визначаються вмістом гіпсу в вихідній сировинній суміші і стабільністю температури гідратації. З підвищенням температури вміст еtringіту збільшується, а його стабільність зменшується [5].

Автори [6] встановили, що не залежно від співвідношення між гіпсом і C_3A у водному середовищі енергетично краще утворення високосульфатної форми ГСАК.

За даними праць [7; 8], ГСАК із часом здатний до часткового переходу в аморфну форму з утворенням кальциту. Зазначається, що відбувається руйнування кристалів ГСАК за довговічного твердіння: в бетоні довговічного твердіння ГСАК не знаходиться [7; 8].

Гідратація C_3A за присутності гіпсу спочатку супроводжується утворенням еtringіту, гідроалюмінату кальцію C_4AH_{13} і гідроксиду алюмінію, а далі утворюється тільки еtringіт і $Al(OH)_3$ [8].

Результати досліджень. Методика дослідження гіпотези впливу поверхні Гіббса на формування мінералів системи композиційного в'язучого полягає у визначенні впливу $y = f(C/A)$, для чого використано методику зміни мінералогічного складу в часі за допомогою рентгенівського апарату.

Дослідження процесів гідратації системи з $C_3A-C\dot{S}H_2$ в часі (3, 7, 14, 28 діб) з метою визначення формування еtringіту та інших мінералів (рис. 1–4) дають можливість визначити їх вплив на властивості композиційних в'язучих речовин.

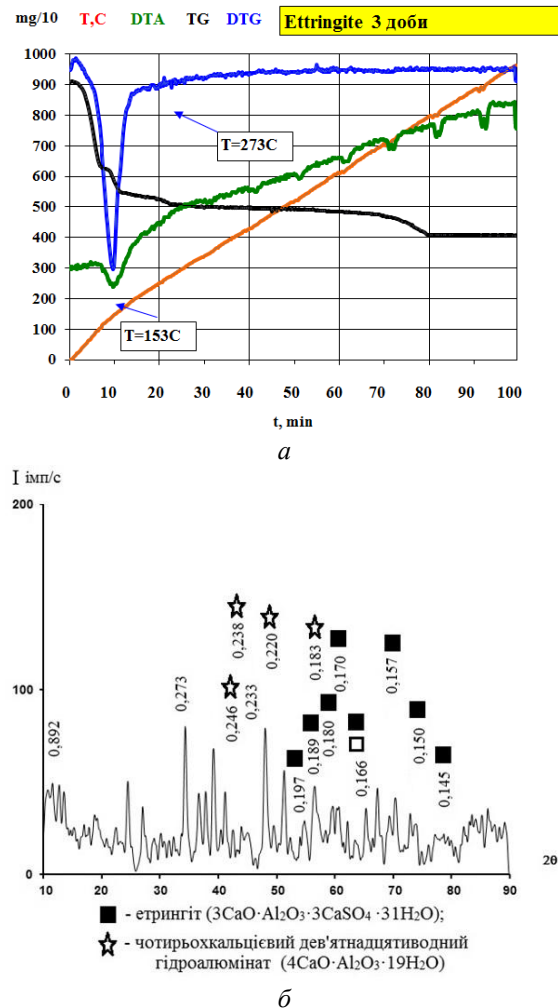


Рис. 1. Криві ДТА (а) та рентгенівська дифрактограма (б) зразків, виготовлених із композиції $C_3A-C\dot{S}H_2$ на 3-тю добу твердіння

На дифрактограмі затверділого композиту $C_3A-C\dot{S}H_2$ з'являються через 3 доби твердіння основні лінії гідратних фаз еtringіту ($d/n = 0,892; 0,273; 0,260; 0,245; 0,241; 0,233; 0,197; 0,189; 0,180; 0,170; 0,166; 0,163; 0,157; 0,150; 0,145$ nm), чотирикальцієвого дев'ятнадцятиводного гідроалюмінату ($d/n = 0,246; 0,238; 0,220; 0,183$ nm) (рис. 3, 5). Через 28 діб твердіння основні міжплощинні відстані і інтенсивності гідратних фаз еtringіту ($d/n = 0,475; 0,399; 0,327; 0,2773; 0,2680; 0,225; 0,2130; 0,189; 0,187; 0,180; 0,166; 0,162; 0,155$ nm), (рис. 4). Спостерігаються лінії чотирикальцієвого дев'ятнадцятиводного гідроалюмінату ($d/n = 0,475; 0,248; 0,207; 0,197; 0,164$ nm), (рис. 1–4).

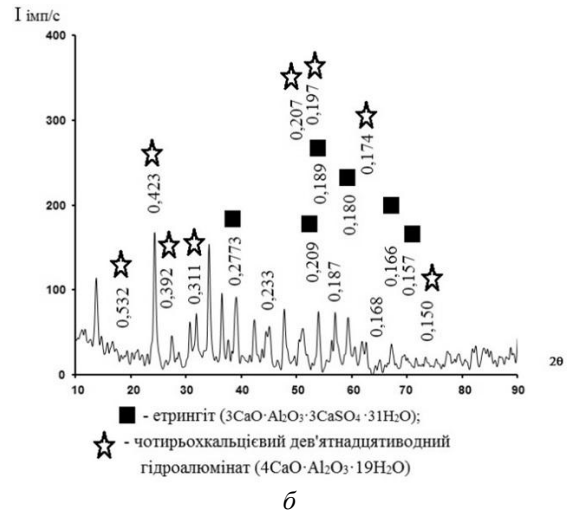
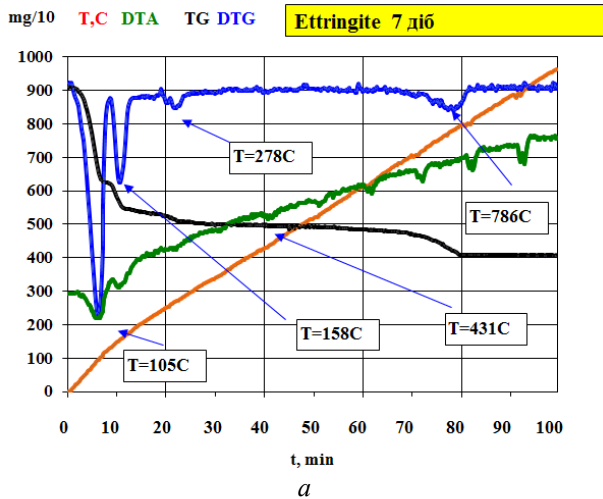


Рис. 3. Криві ДТА (а) та рентгенівська дифрактограма (б) зразків, виготовлених із композиції $\text{C}_3\text{A}-\text{C}\bar{\text{S}}\text{H}_2$ на 14-ту добу твердіння

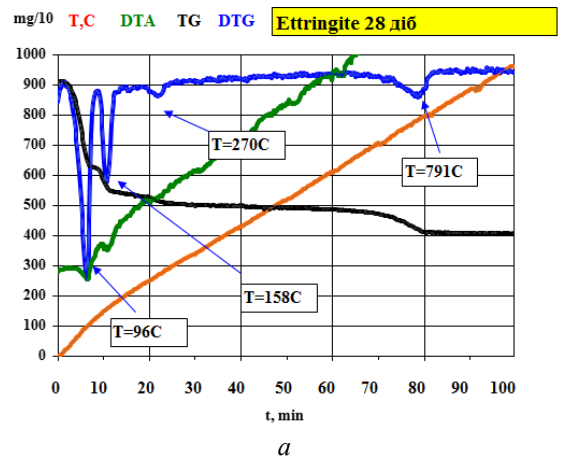
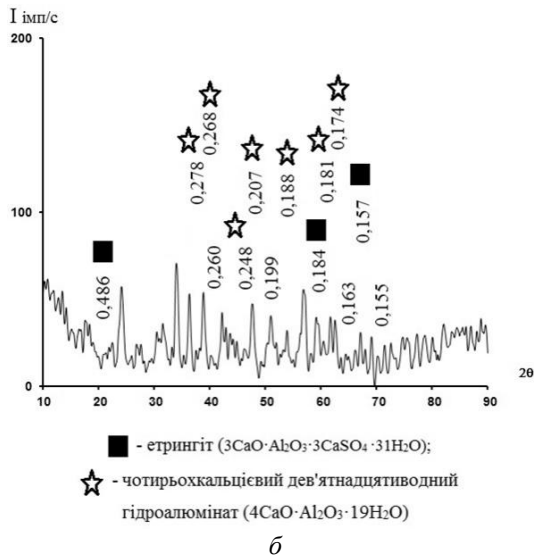


Рис. 2. Криві ДТА (а) та рентгенівська дифрактограма зразків, виготовлених із композиції $\text{C}_3\text{A}-\text{C}\bar{\text{S}}\text{H}_2$ на 7-му добу твердіння

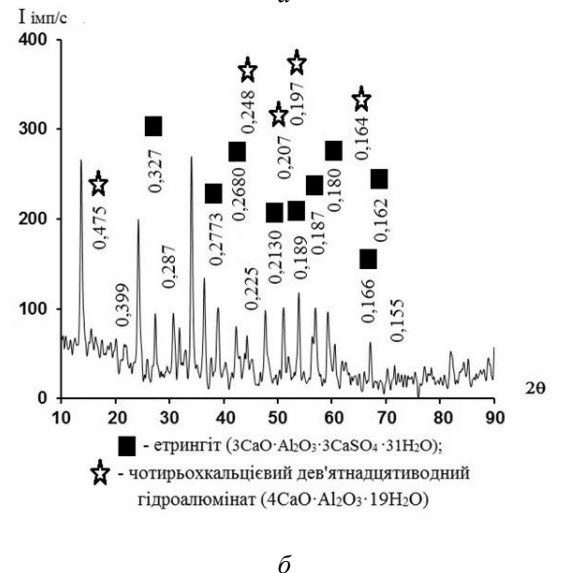
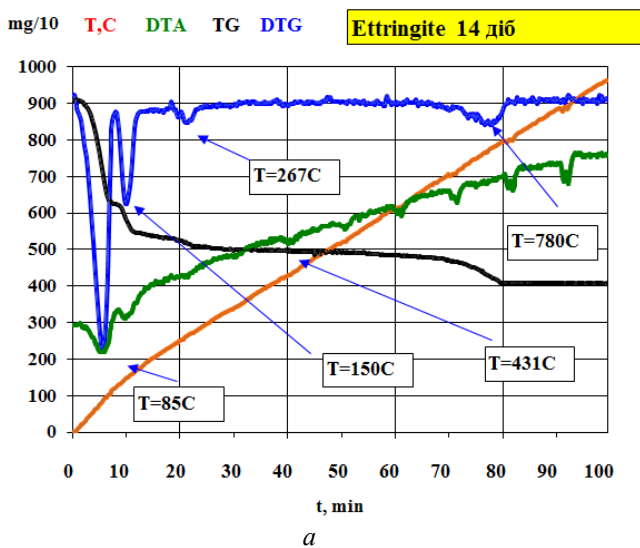


Рис. 4. Криві ДТА (а) та рентгенівська дифрактограма (б) зразків, виготовлених із композиції $\text{C}_3\text{A}-\text{C}\bar{\text{S}}\text{H}_2$ на 28-му добу твердіння

Порівняти інтенсивності ліній мінералів у часі, тобто їх зміну, звичайний якісний

аналіз не дає можливості, але з'ясовано, що в результаті утворення первинного еtringіту відбувається збільшення щільності та міцнісних показників.

Методика досліджень полягала в модифікуванні напівводного гіпсу глиноземистим цементом. При цьому визначали оптимальну кількість модифікатора для підвищення фізико-механічних властивостей, а також вплив мінералогічного складу модифікованого в'язучого.

Для досліджень використовували гіпс Г-5-II у кількості 30...70 %, основним мінералом якого є напівводний гіпс (рис. 5).

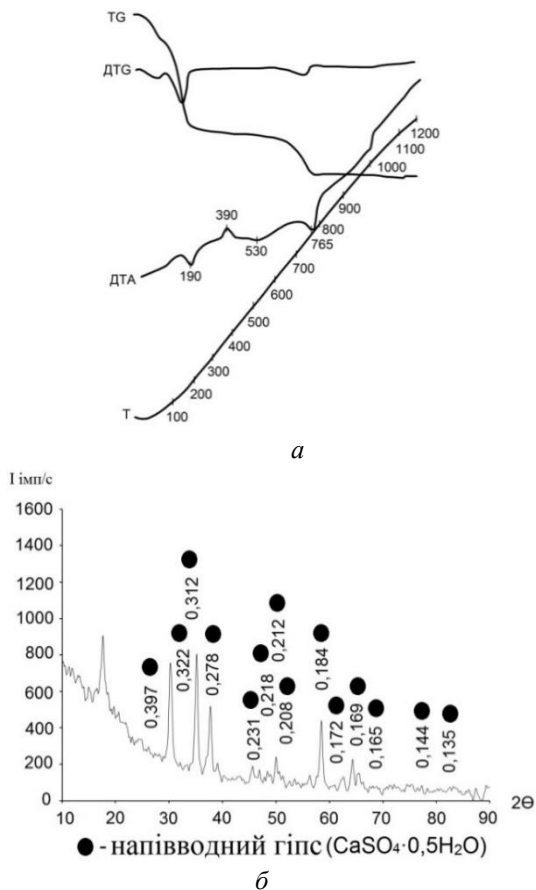


Рис. 5. Криві ДТА (а) та рентгенівська дифрактограма (б) гіпсу Г-5-II

Рентгенофазовий аналіз та обробка його даних виявили наявність нових продуктів гідратації. На дифрактограмі затверділого глиноземистого цементу ГЦ-500 з'являються через одну добу твердіння основні лінії гідратних фаз гідроалюмінату ($d/n = 0,820; 0,231; 0,217; 0,348; 0,199; 0,186; 0,178; 0,176; 0,162; 0,154$ нм), кубічного

шестиводного гідроалюмінату ($d/n = 0,315; 0,168; 0,160; 0,154$ нм); чотирикальцієвого дев'ятнадцятиводного гідроалюмінату ($d/n = 0,217; 0,207; 0,197; 0,170; 0,162$ нм) (рис. 5–7).

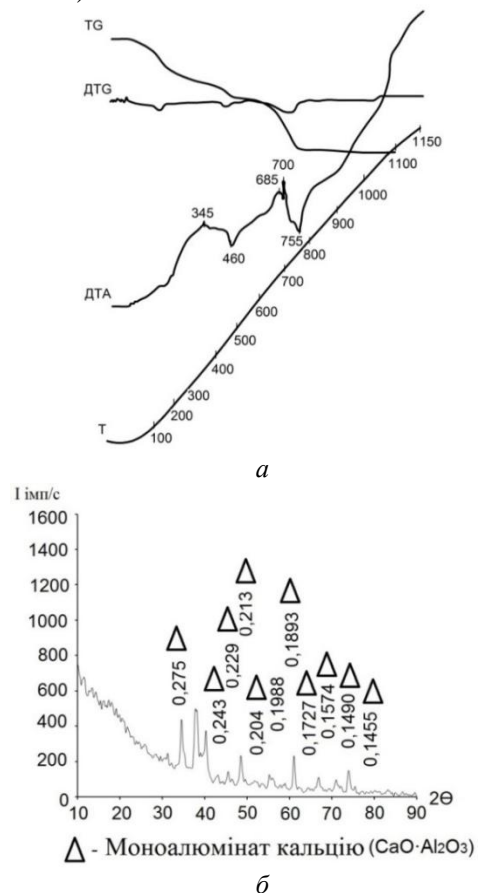


Рис. 6. Криві ДТА (а) та рентгенівська дифрактограма (б) глиноземистого цементу ГЦ-500

Із додаванням до глиноземистого цементу ГЦ-400 гіпсу марки Г-5 з'являються через 3 доби твердіння основні міжплощинні відстані й інтенсивності гідратних фаз еtringіту ($d/n = 0,973; 0,561; 0,388; 0,348; 0,256$ нм) (рис. 8–10). Спостерігаються лінії чотирикальцієвого тринадцятиводного гідроалюмінату ($d/n = 0,423; 0,266; 0,246; 0,238; 0,212; 0,168$ нм), чотирикальцієвого дев'ятнадцятиводного гідроалюмінату ($d/n = 0,331; 0,238; 0,151$ нм), гідроалюмінату ($d/n = 0,463; 0,255; 0,176; 0,151$ нм), чотирикальцієвого дев'ятнадцятиводного гідроалюмінату ($d/n=0,331; 0,238; 0,151$ нм) (рис. 8–10).

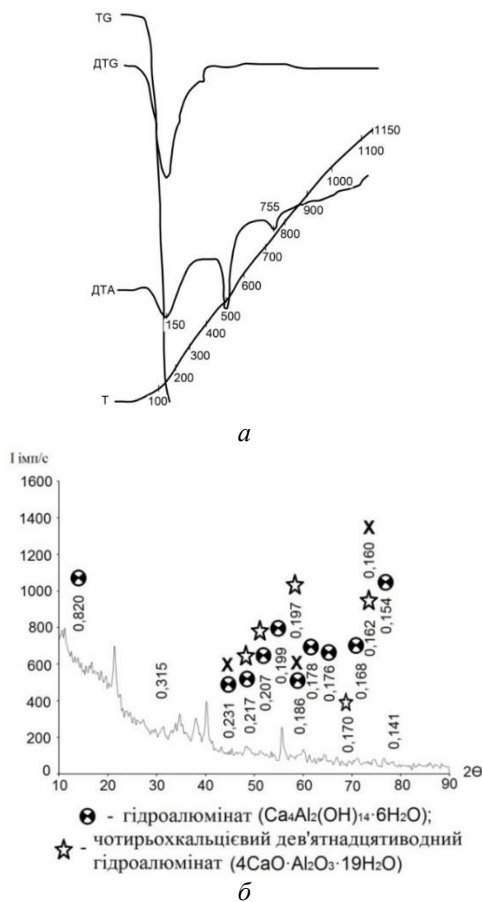


Рис. 7. Криві ДТА (а) та рентгенівська дифрактограма (б) гідратованого (без добавок) глиноземистого цементу ГЦ-500

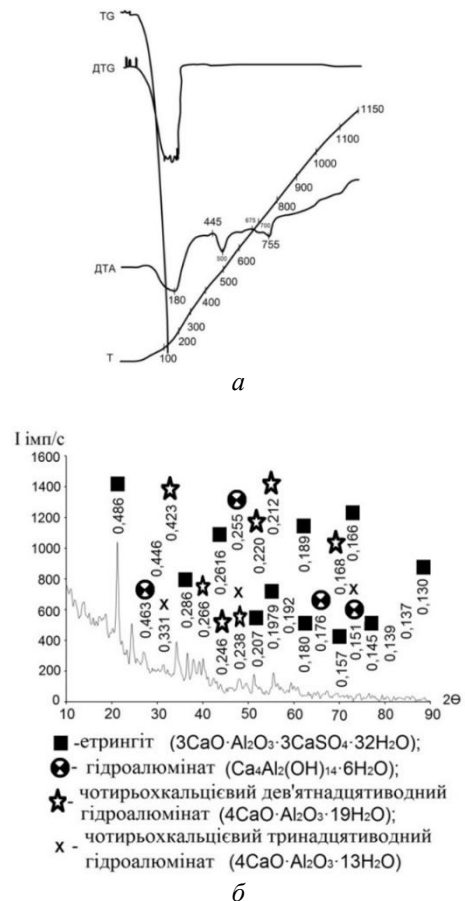


Рис. 8. Криві ДТА (а) та рентгенівська дифрактограма (б) 70 % ГЦ-500+30 % гіпсу

Дослідження зміни структури за допомогою аналізу якісних дифрактограм і результатів диференційно-термічного аналізу вказує збільшення кількості еtringіту в процесі твердіння до 24 діб, але для достовірності гіпотези слід провести кількісний рентгенофазовий аналіз.

Для досліджень використано мінерал СзА та двоводний гіпс для створення штучного еtringіту. Потім проводили дослідження на композиті системи «глиноземистий цемент та гіпс».

Рентген та ДТА глиноземистого цементу ГЦ-500 показані на рисунку 6.

Криві ДТА та дифрактограма гідратованого глиноземистого цементу без добавок наведено на рисунку 7.

Результати проведених досліджень композиційних складів глиноземистий цемент ГЦ-500 в кількості 30...70 % приведені на рисунках 8–10.

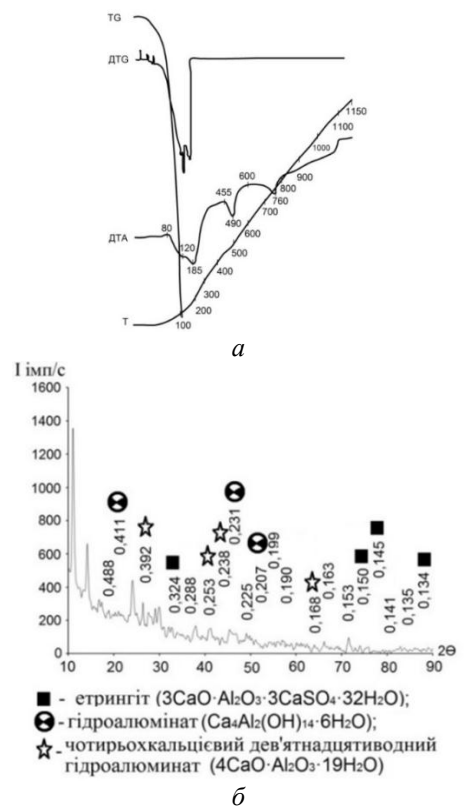


Рис. 9. Криві ДТА (а) та рентгенівська дифрактограма (б) 50 % ГЦ-500+50 % гіпсу

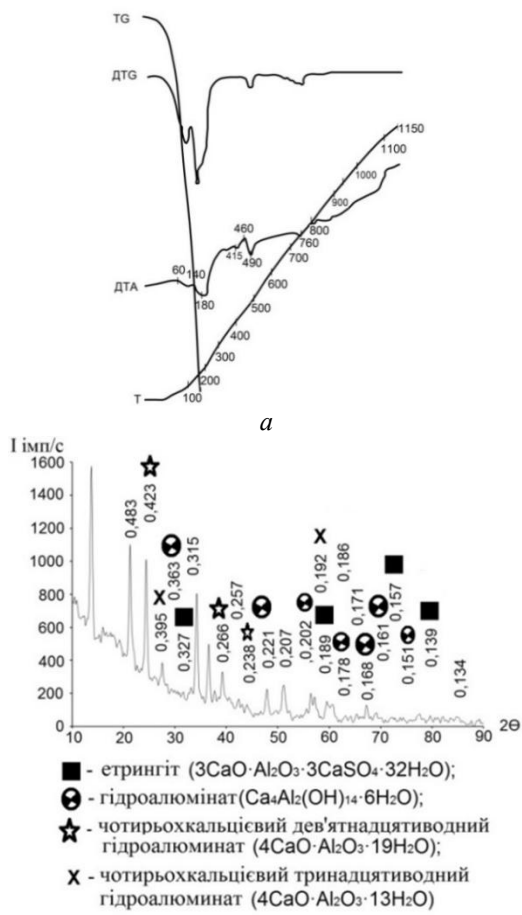
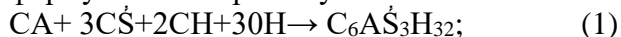
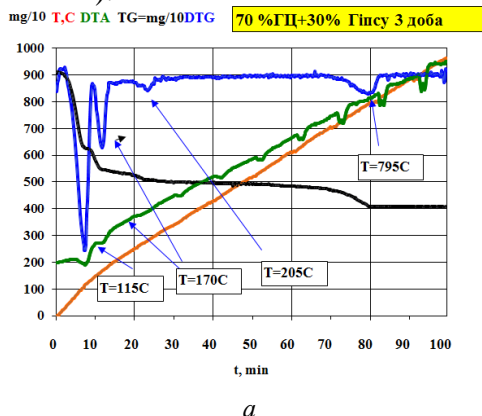


Рис. 10. Криві ДТА (а) та рентгенівська дифрактограма (б) 30 % ГЦ-500+70 % гіпсу

У процесі гідратації відбуваються такі взаємодії за присутності гіпсу, пов'язані з формуванням еtringіту:



У процесі тужавлення та твердіння через 3 доби інтенсивність ліній еtringіту та гідроксиду кальцію зростає, що підтверджує інтенсифікацію процесу гідратації (рис. 11–14).



а

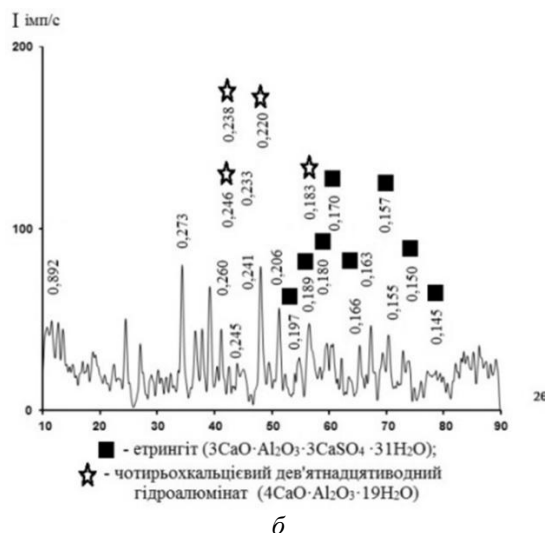
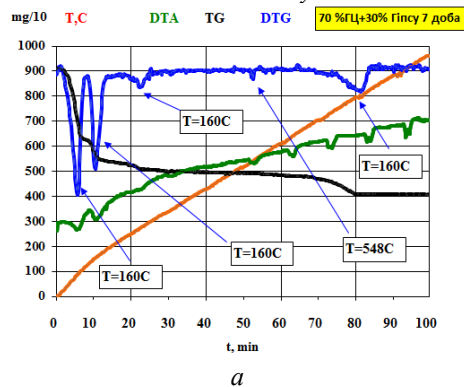
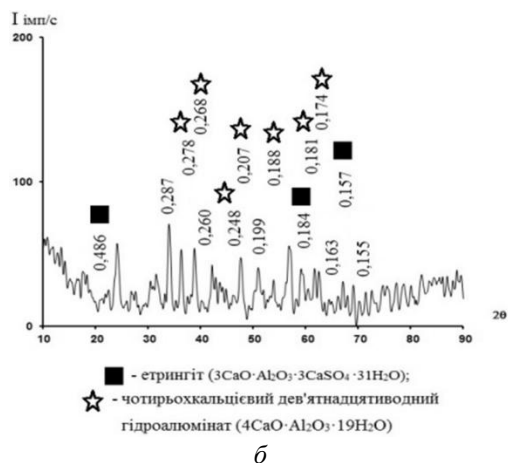


Рис. 11. Диференційно-термічний аналіз (а) та рентгенівська дифрактограма (б) еtringітової фази затверділого композиту, що складається з: 70 % глиноземистого цементу та 30 % гіпсу на 3-тю добу



а



б

Рис. 12. Диференційно-термічний аналіз (а) та рентгенівська дифрактограма (б) еtringітової фази затверділого композиту, що складається з: 70 % глиноземистого цементу та 30 % гіпсу на 7-му добу

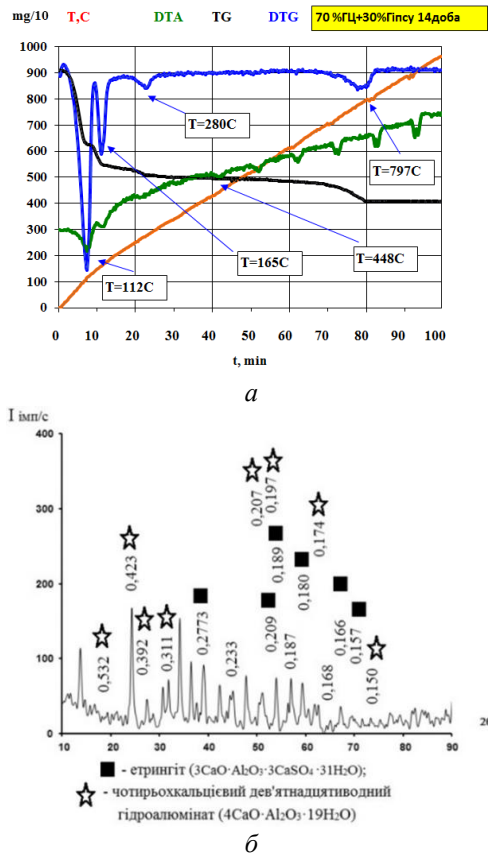


Рис. 13. Диференційно-термічний аналіз (а) та рентгенівська дифрактограма (б) еtringітової фази затверділого композиту, що складається з: 70 % глиноземистого цементу та 30 % гіпсу на 14-ту добу

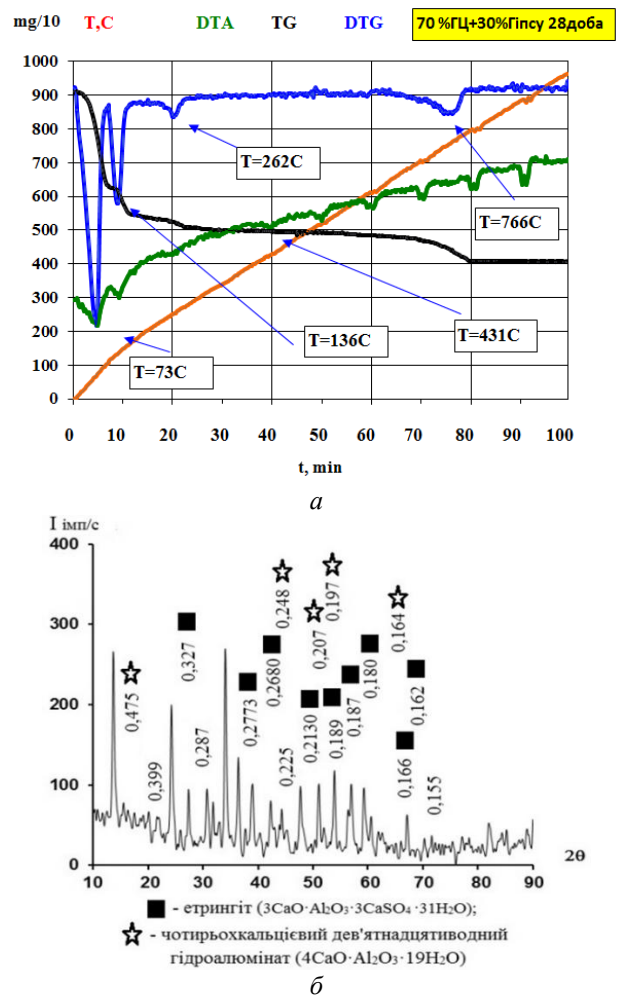


Рис. 14. Диференційно-термічний аналіз (а) та рентгенівська дифрактограма (б) еtringітової фази затверділого композиту, що складається з: 70 % глиноземистого цементу та 30 % гіпсу на 28-му добу

Таблиця 1

Визначення нормальної густини пасти, що складається із 70 % глиноземистого цементу та 30 % гіпсу

№ п/п	Маса цементу, г	Маса гіпсу, г	Маса води, мл	В/Ц	Глибина занур, мм
1	245	105	115,5	0,33	10
2	210	90	90	0,3	6
3	210	90	156	0,52	40
4	210	90	147	0,49	40
5	210	90	135	0,45	40
6	210	90	126	0,42	40
7	210	90	114	0,38	40
8	210	90	120	0,4	39
9	210	90	117	0,39	38
10	210	90	111	0,37	38
11	210	90	108	0,36	37
12	210	90	105	0,35	35

Початок тужавлення в'язучого – 4 хв. 56 сек.

Кінець тужавлення в'язучого – 6 хв. 39 сек.

Таблиця 2

Визначення нормальної густини пасти, що складається із 50 % глиноземистого цементу та 50 % гіпсу

№ п/п	Маса цементу, г	Маса гіпсу, г	Маса води, мл	В/Ц	Глибина занур.,мм
1	150	150	117	0,39	36
2	115	150	120	0,45	37
3	150	150	118,5	0,4	37

Початок тужавлення в'язучого – 4 хв. 40 сек.

Кінець тужавлення в'язучого – 6 хв. 05 сек.

Таблиця 3

Визначення нормальної густини пасти, що складається із 30 % глиноземистого цементу та 70 % гіпсу

№ п/п	Маса цементу, г	Маса гіпсу, г	Маса води, мл	В/Ц	Глибина занур.,мм
1	90	210	117	0,39	20
2	90	210	126	0,42	39
3	90	210	123	0,41	36÷37

Початок тужавлення в'язучого – 4 хв. 53 сек.

Кінець тужавлення в'язучого – 6 хв. 23 сек.

Міцність на стиск глиноземистого цементу у віці 1–3 доби залежить від водоцементного відношення, яке залежить від величини питомої поверхні, кількості активних центрів кристалізації та рухливості вихідних компонентів.

Тому, з метою збільшення еtringіту, проводили активацію глиноземистого цементу шляхом додавання гіпсу та визначали водопотребу композиційних в'язучих речовин на основі глиноземистого цементу, гіпсу (табл. 1–3).

Найбільше водовідділення має склад сировинної суміші на основі 30 % глиноземистого цементу та 70 % гіпсу, що пояснюється її меншою питомою поверхнею порівняно з добавками зі складами сировинної суміші на основах: 30 % глиноземистого цементу та 70 % гіпсу, а також 50 % глиноземистого цементу та 50 % гіпсу. Значне водовідділення спостерігається протягом 2 годин. Гіпс має вищу водопотребу, ніж глиноземистий цемент, і утворене дисперсне середовище буде значно стійкішим до розшарування. Водовідділення для складів, що містять 30 % глиноземистого цементу та 70 % гіпсу, а

також 50 % глиноземистого цементу та 50 % гіпсу стабілізується протягом 3 годин.

Із метою стабілізації нестабільної еtringітової фази проведено дослідження на двокомпонентній сировинній суміші оптимального складу: 70 % глиноземистого цементу та 30 % гіпсу.

Стабілізацію еtringіту композиту оптимального складу – 70 % глиноземистого цементу та 30 % гіпсу визначали за результатами топонімічних реакцій переходу системи з макро- в мікро- та наносистему зі зміною часу, проводячи рентгенофазовий аналіз через 3, 7, 14 та 28 діб.

Результати досліджень стабілізації еtringітової фази композиту оптимального складу – 70 % глиноземистого цементу та 30 % гіпсу, на 3-, 7-му добу (рис. 11, 12), 14- та 28-му добу (рис. 13, 14).

Рентгенофазовий аналіз та обробка його даних виявили наявність нових продуктів гідратації. На дифрактограмі затверділого композиту, що складається з: 70 % глиноземистого цементу та 30 % гіпсу, з'являються на 3, 7, 14 та 28-му доби твердіння основні лінії гідратних фаз

етрингіту ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 31\text{H}_2\text{O}$) ($d/n = 0,327; 0,2773; 0,2680; 0,2487; 0,238; 0,1979; 0,189; 0,180; 0,166; 0,162$ нм); основні міжплощинні відстані й інтенсивності гідратних фаз гідроалюмінату ($\text{Ca}_4\cdot\text{Al}_2(\text{OH})_{14}\cdot 6\text{H}_2\text{O}$) ($d/n = 0,820; 0,351; 0,204; 0,178; 0,153$ нм); чотирикальцієвого дев'ятнадцятиводного гідроалюміната ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 19\text{H}_2\text{O}$) ($d/n = 0,286; 0,164; 0,155$ нм); чотирикальцієвого тринадцятиводного гідроалюміната ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 13\text{H}_2\text{O}$) ($d/n = 0,472; 0,286; 0,173; 0,162$ нм) (рис. 11–14).

На 14- та 28-му доби твердіння композиту з'являються основні міжплощинні відстані і інтенсивності гідратних фаз еترینгіту ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 31\text{H}_2\text{O}$) ($d/n = 0,402; 0,388; 0,194; 0,134$ нм).

За результатами досліджень [9] встановлено, що в разі взаємодії системи $\text{C}_3\text{A}-\text{C}_2\text{S}$ з водою в початковий період відбувається розчинення C_3A з дуже швидким осіданням еترینгіту. В період від 1-ї до 3-ї доби концентрація CaO і Al_2O_3 в рідкій фазі також швидко знижується, а в

подальшому цей процес сповільнюється. Через одну годину після гідратації відношення CaO до Al_2O_3 близьке 1. У процесі подальшої гідратації це відношення зростає до 1,8–2 [9–12].

Висновки.

Композитом системи глиноземистий цемент + гіпс можна замінити штучну систему зі штучним еترینгітом.

За вибраною методикою досліджень відбувалася модифікація напівводного гіпсу глиноземистим цементом. Експериментальним шляхом встановлено оптимальну кількість модифікатора – 70 % глиноземистого цементу, яка необхідна для підвищення фізико-механічних властивостей, а також формування необхідного мінералогічного складу модифікованого в'язучого.

За гідратації модифікованих в'язучих речовин на основі глиноземистого цементу та гіпсу відбувається утворення еترینгіту, який дав можливість сформуванню необхідної структури та основні фізико-механічні властивості.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кучеренко О. А. Структурні та термодинамічні характеристики еترینгіту. *Технології бетонів*. 2012. №9–10 (74–75). С. 60–63.
2. Дерев'яно В. М., Курятник Т. С., Кондратьєва Н. В. Механізм утворення еترینгіту та його вплив на структуру цементного каменю. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2005. Вип. 20. С. 67–79.
3. Кривенко П. В., Пушкарьова К. К., Барановський В. Б., Кочевих М. О., Хасан Є. Г., Константиновський Б. Я., Ракша В. О. Будівельне матеріалознавство : підруч. за ред. П. В. Кривенко. Київ : Ліра-К, 2015. 624 с.
4. Пушкарьова К. К., Кочевих М. О. Матеріалознавство для архітекторів та дизайнерів : навч. посіб. Київ : Вид-во «Ліра-К», 2019. 424 с.
5. Kondofesky-Mintova L., Plank J. Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete. *Proceedings Tenth International Conference*. October 2012, Prague, Czech Republic. P. 423.
6. Hansen T. Strength, elasticity and creep ad related to the internal structure of concrete. *Proceedings of the Fourth International Symposium on the Chemistry of Cement*. Washington, D. C. 1960. Vol. II, p. 709.
7. Rossetti A., Chiocchio G., Paolini A. Expansive properties of the mixture $\text{C}_4\text{A}\cdot\text{H}_7 - 2\text{C}_2\text{S}$. *Cement and Concrete Research*. 1982. Vol. 12, № 6. Pp. 577–585.
8. Nakamura T., Sudoh G., Akaiwa S. Mineralogical Composition of Expansive Cement Clinker Rich in SiO_2 and its Expansibility. *Symposium on the Chemistry of Cement*. Vol. IV. Tokyo, 1968. Pp. 351–365.
9. Pushkarova K., Sukhanevych M., Marsikh A. Using of untreated carbon nanotubes in cement composition. *Materials Science Forum*. Vol. 865. Brno, Czech Republic, 2016. Pp. 6–11.
10. Рунова Р. Ф., Дворкін Л. Й., Дворкін О. Л., Носовський Ю. Л. В'язучі речовини : підруч. Київ : Основа, 2012. 448 с.
11. Пашенко О. О. В'язучі матеріали : підруч. Київ : Вища школа, 1995. 416 с.
12. Land G., Stephan D. The Acceleration of the Hydration of Cements with and without supplementary cementitious materials by C–S–H seeds. *19 Internationale Baustofftagung*. 16–18 September, 2015. Bauhaus–Universität Weimar. Bundesrepublik Deutschland. Band 2. Pp. 1011–1017.

REFERENCES

1. Kucherenko O.A. *Strukturni ta termodynamichni kharakterystyky ettrynhitu* [Structural and thermodynamic characteristics of ettringite]. *Tekhnolohiyi betoniv* [Technologies of Concrete]. 2012, no. 9–10 (74–75), pp. 60–63. (in Ukrainian).
2. Derevyanko V.M., Kuryatnik T.S. and Kondratieva N.V. *Mekhanizm utvorennia ettrynhitu ta yoho vplyv na strukturu tsementnoho kameniu* [The mechanism of ettringite formation and its effect on the structure of cement stone]. *Visnyk Odes'koyi derzhavnoyi akademiyi budivnytstva ta arkhitektury* [Bulletin of the Odessa State Academy of Construction and Architecture]. 2005, iss. 20, pp. 67–79. (in Ukrainian).
3. Kryvenko P.V., Pushkariova K.K., Baranovskyi V.B., Kochevyh M.O., Hasan Ye.G., Konstantynivskiy B.Ya. and Raksha V.O. *Budivel'ne Materialoznavstvo : pidruchnik* [Materials Science in Construction : textbook]. Ed. by P.V. Kryvenko. Kyiv : Lira-K Publ., 2015, 624 p. (in Ukrainian).
4. Pushkariova K.K. and Kochevykh M.O. *Materialoznavstvo dlya Arhitektoriv ta Dizayneriv : navchal'nyy posibnyk* [Materials Science for Architects and Designers : textbook]. Kyiv : Lira-K Publ., 2018, 424 p. (in Ukrainian).
5. Kondofesky-Mintova L. and Plank J. Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete : Proceedings Tenth International Conference. October 2012, Prague, Czech Republic, 423 p.
6. Hansen T. Strength, elasticity and creep ad related to the internal structure of concrete. Proceedings of the Fourth International Symposium on the Chemistry of Cement. Washington, D. C., 1960, vol. II, 709 p.
7. Rossetti A., Chiochio G. and Paolini A. Expansive properties of the mixture C4AŠH17 – 2CŠ. Cement and Concrete Research. 1982, vol. 12, no. 6, pp. 577–585.
8. Nakamura T., Sudoh G. and Akaiwa S. Mineralogical Composition of Expansive Cement Clinker Rich in SiO₂ and its Expansibility. Symposium on the Chemistry of Cement. Tokyo, 1968, vol. IV, pp. 351–365.
9. Pushkarova K., Sukhanevych M. and Marsikh A. Using of untreated carbon nanotubes in cement composition. Materials Science Forum. Brno, Czech Republic, 2016, vol. 865, pp. 6–11.
10. Runova R.F., Dvorkin L.J., Dvorkin O.L. and Nosovs'kij Yu.L. *V'yazhuchi rehovini* [Binders]. Kyiv : Osnova Publ., 2012, 448 p. (in Ukrainian).
11. Pashchenko O.O. *V'yazhuchi materiali* [Binding Materials]. Kyiv : Vishcha Shkola Publ., 1995, 416 p. (in Ukrainian).
12. Land G. and Stephan D. The Acceleration of the Hydration of Cements with and without supplementary cementitious materials by C–S–H seeds. 19 Internationale Baustofftagung. 16–18 September, 2015, Bauhaus–Universität Weimar, Bundesrepublik Deutschland, Band 2, pp. 1011–1017.

Надійшла до редакції: 30.08.2024.