

ВПЛИВ ДОМІШОК SIC-MICRO ТА SIC-NANO НА ПРОЦЕСИ ГІДРАТАЦІЇ МІНЕРАЛЬНИХ В'ЯЖУЧИХ РЕЧОВИН

INFLUENCE OF SIC-MICRO AND SIC-NANO ADDITIVES ON THE MINERAL BINDER HYDRATION PROCESSES

Дерев'янюк В. М., д.т.н., професор, ORCID: 0000-0002-9733-9558, Гришко

Г. М., к.т.н., доцент, ORCID: 0009-0002-3872-6555, **Савін Ю.Л.,** к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0002-3259-4451, **Журба І.А.,** студент, ORCID: 0009-0003-4752-6384 (Український державний університет науки і технологій, Навчально-науковий інститут «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», м. Дніпро)

Dereviako Viktor, Doctor of Engineering, professor, ORCID: 0000-0002-9733-9558, **Hryshko Hanna, Ph.D.,** associate professor, ORCID: 0009-0002-3872-6555, **Savin Yurii, Ph.D.,** associate professor, ORCID: 0000-0002-3259-4451, **Zhurba Ivan, Student,** ORCID: 0009-0003-4752-6384 (Ukrainian State University of Science and Technologies, Educational and scientific institute “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, Dnipro).

При проведенні досліджень вивчено вплив основних факторів, на процеси твердіння і формування структури гіпсових в'язучих речовин, визначення взаємозв'язку між нанорозмірними характеристиками добавок і мікроструктурними властивостями кінцевого матеріалу, а також розроблено теоретичну модель, що пояснює спостережувані ефекти.

One of the modern approaches to the mineral binder property improvement is the nanomodification problem solving based on a comprehensive approach to changing the material's structure. The core idea involves the introduction of nanostructured elements and the use of surfactants (surface-active agents), which makes it possible to significantly enhance the physical and mechanical properties of the final material or even impart new, unique characteristics to it. This approach enables the hydration optimization and structure formation processes, opening up broad perspectives for the practical application of such modified binders. Nanoparticles, acting at the early stages of hydration, may change the gypsum crystallization morphology, regulate the crystal size and shape, and thereby directly influence the artificial stone structure, density, strength, and durability.

Purpose of the study: to identify the patterns of the gypsum binder structure formation mechanisms and to improve their physical and mechanical properties through the introduction of modifying nanoadditives and surfactants.

Currently, there are very few scientific studies dedicated to examining the combined influence of surfactants and nanomodifiers on the hydration processes and material structure, which highlights the relevance of further research in this field. The study discovers the impact of key factors on the hardening and structure formation processes of gypsum binders, determines the correlation between the additive nanoscale characteristics and the final material microstructural properties and proposes a theoretical model that explains the observed effects. All of this enables targeted control over the modification processes and the development of a new generation of materials with enhanced performance characteristics.

Ключові слова:

мінеральні в'язучі, наноматеріали, наномодифікація, гіпсові в'язучі.
mineral binders, nanomaterials, nanomodification, gypsum binders.

Вступ. Одним із сучасних напрямків удосконалення властивостей мінеральних в'язучих речовин є вирішення проблеми їх наномодифікації, що базується на комплексному підході до зміни структури матеріалу. Тобто коли за рахунок введення наноструктурних елементів та додатків поверхнево-активних речовин (ПАР) можна суттєво покращити або отримати нові властивості матеріалу. В цьому плані перспективним напрямком є застосування наноматеріалів для модифікації гіпсових в'язучих речовин.

Актуальність досліджень полягає у визначенні основних факторів впливу на процеси гідратації в'язучих речовин, взаємозв'язок структури штучного каменю і нанохарактеристичних параметрів та їх теоретичне обґрунтування.

Аналіз досліджень та публікацій. В науковій літературі представлено широкий спектр добавок-модифікаторів, які можна розділити на групи: мікро, ультра, нано. Найбільш поширені: мікрокремнезем, метакаолін, таурит, кремнегель, нанопорошок діоксиду кремнію, шунгітовий порошок, вуглецеві нанотрубки, вуглецеві колоїдні наночасточки, нанопорошки [1].

Модифіковані мінеральні в'язучі є багатокомпонентними системи, що складаються із в'язучих речовин (одного, або декількох), нанодобавки, або комплексу, поверхнево активних речовин (ПАР) та затворювача. При проведенні досліджень необхідна розробка методології і методик експериментів, щоб враховувати індивідуальний та сумісний вплив компонентів. І що, головне, особлива увага приділяється формуванню висновків і рекомендацій.

В представлених роботах [1-5] спостерігаються суттєві відмінності, пов'язані з **концентраційними** залежностями властивостей та структури і

відповідно властивостей, наприклад, міцності. Середній показник підвищення міцності становить близько 20-50%. Вміст модифікуючих добавок має широкий спектр і в багатьох випадках значно відрізняється, але у в основному для групи макро- і мікро знаходиться у межах до 1-2 %, ультра- і нано- 0,005-0,25 %. Відмінності результатів можна пояснити наступними факторами [1]: природа модифікаторів, параметри синтезу, структурно-морфологічні особливості модифікаторів, спосіб введення, ступінь диспергування, хімічний склад поверхні.

Гіпотези, що пояснюють зміну властивостей в'язучого при модифікуванні ультрадисперсними та нанодобавками можна згрупувати таким чином [6]:

- наночастинки впливають на електроповерхневі властивості, змінюється поверхневий заряд (Фішер Г.Б., Плугін А. А.);
- змінюють реологічні характеристики (Войтовіч Є. В.);
- відіграють роль центрів кристалізації (Яковлев Г. І.). В цьому випадку суттєве значення має вміст та розмір частинок;
- збільшують кількість точкових контактів і сили зчеплення між часточками в контакт (Гаркаві М. С., Яковлев Г. І.);
- підвищують поверхневу енергією, що впливає на морфологію кристалічних новоутворень (Бур'янов А. Ф, Кондратьєва Н. В., Токарев Ю. В., Дерев'янка В. М).

На сьогодні розвиток цього напрямку потребує ґрунтовної теоретичної бази та експериментального підтвердження [7].

Постановка мети і задач досліджень. Алгоритм вирішення проблеми використання ультра- і нанодобавок та сучасних технологій раціонального модифікування можна представити наступним чином:

- дослідження широкого спектру модифікаторів з визначенням основних факторів впливу та можливості використання для покращення якісних характеристик будівельних матеріалів;
- розробки технологій введення малої кількості модифікаторів у в'язучі речовини;
- структурно-морфологічні зміни в продуктах гідратації;
- встановлення залежності формування структури від нанохарактеристичних параметрів ультра і нанодобавок при модифікуванні.

Матеріали та обладнання. В даній роботі проводилося дослідження впливу ультра- та нанорозмірних модифікаторів на властивості мінеральних в'язучих речовин. З метою мінімізації часу випробувань та теоретичної розробки впливу нанододатків на процеси гідратації мінеральних в'язучих речовин в роботі використали будівельний гіпс Г5-Н-ІІ ДСТУ Б В.2.7-82:2010.

В якості мікро і нанодобавок використовували **дисперсні порошки SiC**, які додавалась у вигляді розчину з заданою концентрацією (г/л). Мікро-, нанопорошки SiC синтезуються шляхом лазерного піролізу газоподібної суміші (SiH_4 , C_2H_2). виробництва (SL-AM) комерційного мікронного розміру α -SiC (чистота > 99,5%; d50 ~15 мкм; Beijing Zhongjinyan Co. Ltd., Китай) і нанорозмірні α -SiC (чистота >9 9,9%; d50 ~ 40 нм [8]).

Важливою складовою матеріалів досліджень є **поверхнево-активні речовини (ПАР), використання яких** пов'язано з процесом диспергації нанодобавок і добавок вміст яких менше 1% в суміші.

На основі апіорної інформації і згідно програми досліджень проведено визначення ефективності дії наступних поверхнево-активних речовин, що найбільш широко використовуються для регулювання властивостей мінеральних в'язучих речовин.

Суперпластифікатор полікарбоксилатного типу Basf Glenium **ACE 430 (PCE)** є добавкою нового покоління на основі поверхнево-активних полімерів з наноспроекованими бічними ланцюгами [9]. Середня молярна маса суперпластифікатора PCE становить близько 10 000 г/моль. Згідно з даними ІЧ-спектроскопії в складі PCE присутні активні полярні групи: $-\text{SO}_3$; $-\text{OH}$; $-\text{COO}$; $-\text{CO}$, а також групи $-\text{COOR}$; $-\text{CH}_2\text{OR}$

Проведено попереднє визначення пластифікуючої дії та перевірка степені диспергації ПАР **Master X-SEED 100**. Який згідно з концепцією Crystal Speed Hardening представляє суспензію колоїдних частинок гідросилікатів кальцію – C-S-H [10].

Пластифікатор Sika Visco Crete – рідка добавка на основі модифікованих, рівень pH 8,2. Sika Visco Crete G2 – суперпластифікатор третього покоління на основі полікарбоксилат полімерної технології Visco Crete, рівень pH – 4,0/5,0, щільність- 1,050 до 1,150 г/см³. Хімічна основа – водний розчин модифікованих полікарбоксилатів [11].

Основний матеріал. Програма досліджень впливу домішок SiC -мікро та SiC -nano на процеси гідратації мінеральних в'язучих речовин включає наступні етапи: визначення найбільш ефективної добавки ПАР пластифікуючої дії (табл. 1), концентрації дисперсії в розчині (табл. 2). Вплив SiC -мікро та SiC -nano на процеси гідратації, структуру і властивості продуктів (табл. 1).

Дослідження впливу середовища на ступінь диспергації наночастинок [12] показують, що ізольовані мікро і наночастинки, і їх розчини в воді є енергетичною системою. Внаслідок дисипації енергії можлива агрегація наночастинок з утворенням агломератів.

Таблиця 1

Результати випробувань будівельного гіпсу

Гіпсовий розчин	Терміни схоплення, хв - с		В/Г
	початок	кінець	
Із водопроводною	8-55	12-15	0,63
Із дистильованою водою	9	16	0,63
Добавка Кріопласт	14	26	0,55
Добавка Экспресс Пласт.	9	16	0,60
Добавка Sika Retarber	15	26	0,58
Добавка Pallete No20	21	33	0,51
Добавка VC 2045	8	17	0,52
Sika ViscoCrete G2	23	29	0,45

Як показують попередні дослідження, і не тільки наші, бар'єром що блокує агломерацію може бути поверхнево-активна речовина. З метою визначення найбільш ефективної добавки ПАР пластифікуючої дії для подальшої диспергації мікро і нанодобавок проведено їх дослідження. В результаті яких визначено вплив на основні властивості будівельного гіпсу і оптимальний вміст ПАР (табл. 2).

Таблиця 2

Вплив добавок на властивості гіпса будівельного Г5-Н-II

Показник	Г5- Н- II	Sika Visco-Crete G2	МС Баухеми, 2695 PF	Стахема, STP 156 GL1	МС Баухеми, 7915	Корал, N4Sm
Вміст добавки, %	0	0,8	5	1,5	2	1,5
В/Г	0,64	0,473	0,52	0,53	0,557	0,567
Пластифікуючий ефект, %	0	18,7	14	13	10,3	9,3
Початок тужавлення, хв-с	8-10	22 -10	14-20	10-50	6 -20	39-50
Кінець тужавлення, хв-с	12-20	29-10	21-10	14-10	8-10	43-00
Рзг, МПа	2,2	3,74	3,8	2,71	2,55	1,59
Рст, МПа	4,76	6,68	6,56	5,5	4,31	3,78

Проведеними дослідженнями фізико-механічних властивостей встановлено найбільш ефективні добавки впливу на гіпсові в'язучі речовини

[13]: добавка МС Баухеми, 2695 PF VC 2045, в/г = 0,52; терміни схоплення: початок – 14-20 хв, кінець -21-10; межа міцності при стиску - 6,56 МПа; межа міцності при вигині - 3,8 МПа і добавка Sika ViscoCrete G2 з в/г співвідношенням 0,47 (що знижує кількість води на 17%), терміни схоплення: початок - 22 хв 10 с, кінець – 29-10 хв; межа міцності при стиску - 6,68 МПа; межа міцності при згині до 3,74 МПа.

Для приготування розчину SiC-micro 0,009 і SiC-nano 241 розроблена технологія виготовлення розчину (табл. 3) заданої концентрації (кількість SiC в перерахунку на сухий залишок) добавляється в воду затворювання. Після цього проводиться змішування і формування.

Для приготування розчину SiC-micro 0,009 і SiC-nano 241 розроблена технологія виготовлення розчину (табл. 3) заданої концентрації (кількість SiC в перерахунку на сухий залишок) добавляється в воду затворювання. Після цього проводиться змішування і формування.

Таблиця 3

Розрахункова концентрація

Найменування добавки	Маса добавки, г	Концентрація, г/л	Кількість води, мл
SiC-nano 241	0,06	0,1	600
SiC-micro 0,009	4	1	1000

Технологія виробництва концентрату передбачає попереднє розподілення добавки SiC-nano 241, або SiC-micro 0,009 мм і ПАР Sika ViscoCrete G2 з водою в турбінному змішувачі, після цього ультразвукове диспергування суспензії. На виробництві концентрат вводиться в воду затворювання з розрахунком на сухий залишок і проводиться додаткове перемішування.

Процес гідратації – екзотермічний процес, при якому виділяється значна кількість енергії, що полегшує руйнування кристалічної решітки та дисоціації електролітів. Додавання SiC в водний розчин будівельного гіпсу інтенсифікує процес гідратації, про що свідчить збільшення температурного максимуму та зменшення часу його досягнення (рис. 1).

Для напівгідрата сульфата кальцію без добавок максимальна температура досягала 38 ° С через 27 хвилин. Після модифікації розчину **SiC-micro**, температура збільшувалася до 40 °С – 25 хвилин. Добавка **SiC-nano** - максимальна температура 42 °С через 22 хвилини. В третьому періоді температура гіпсу з мікро- та нанодобавками знижується з однаковою швидкістю [16-17]. Швидкість зниження температури характеризується кутом кривої до осі х. Для всіх трьох кривих кути нахилу майже однакові; швидкість зниження температури становить 0,25°С/хв.

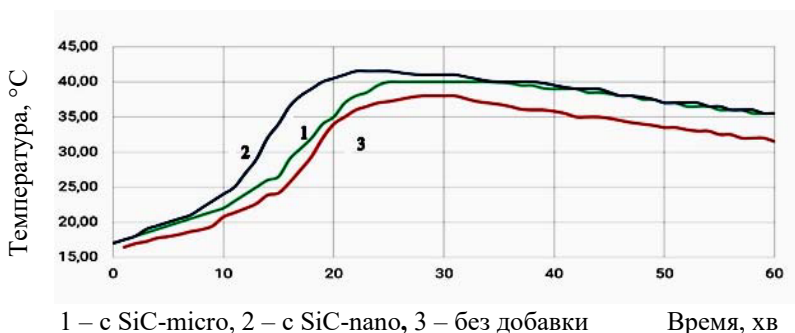


Рис. 1. Графіки зміни температури при гідратації β-напівводного гіпсу з добавками SiC-micro, SiC-nano

Модифікація добавками SiC-micro, SiC-nano дозволяє інтенсифікувати процес гідратації напівводного гіпсу та утворення дигідрату за рахунок збільшення поверхневої енергії твердої фази розчину і тим, що мікро і наночастинки відіграють роль центрів кристалізації і в результаті терміни схоплення значно змінюються (рис. 2).

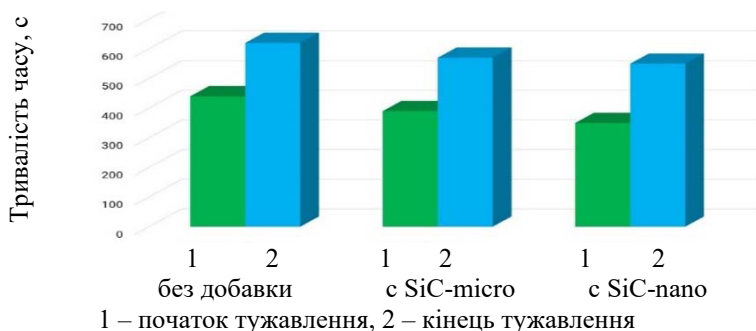


Рис. 2. Діаграми часу схоплення при гідратації напівводного гіпсу

Змінюючи ступінь насичення розчину, вид і розмір добавки можна впливати на адсорбцію пластифікатора на гранях та змінювати поверхневу енергію і відповідно морфологію кристалів. Підтвердження існуючої гіпотези дають результати проведених досліджень при вирощуванні кристалів методом зустрічної дифузії із насичених розчинів CaCl_2 та Na_2SO_4 без і з добавками.

Сутність експериментів заключається в визначенні залежності характеристик структури від кристалоутворюючого середовища.



Рис. 3. Фотографії кристалів $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ вирощуваних методом зустрічної дифузії: а) – без добавок; б) – з пластифікатором Sika Visco Grete; в) – Sika Visco Grete і нанопорошок «Таурит»

Структура, форми і розміри визначають властивості затверділих матеріалів. Використовуючи метод зустрічної дифузії в роботі вирощували кристали гіпсу із насичених розчинів CaCl_2 та Na_2SO_4 без і з добавками [14].

Кристали вирощені без додатків (рис. 3а) тонкі та голкоподібні. Розташування кристалів рівномірне; підкладка (основа) приблизно 1 мм. Довжина кристалів близько 3 - 5 мм, ширина 0,1 - 0,15 мм і товщина близько 0,05 мм. Їх формування проходило по кромці стакану.

На фотографіях (рис. 3б) кристали, вирощені в присутності пластифікатора Sika, можна помітити, що їх зростання почалося з однієї точки, вірогідно, це пов'язано зі зміною поверхневого натягу. І в основному всі кристали росли в друзах. Дослідження структури за допомогою електронної мікроскопії показало, що вони мають довжину від 0,7 до 1,5 см, ширина кристала – 0,8-1 мм. При цьому грані уздовж осі (012) розвивалися не рівномірно, в результаті чого форма кристалів з шестикутника трансформувалася в п'ятикутну.

Механізм гідратації мінеральних в'язучих речовин (в даному випадку напівводного сульфата кальцію) при використанні додатків змінюється також за рахунок зміни концентрації розчину і поверхневої енергії. На це вказують і термодинамічні криві в роботі [15].

Наномодифікація, наприклад, добавкою 'Таурит' (рис. 3в) змінює процес гідратації в'язучих речовин і морфологію кристалів.

Модифікація розчину ультра дисперсною добавкою SiC-micro (5%) та Sika Visco Grete (0,2%, концентрація 0,8 г/л) створює кристалоутворююче середовище в якому в процесі гідратації утворюються переважаючою формою кристалів є стовпчаста та деревоподібна (рис. 4). Напрямок росту кристалів видно на мікрофотографіях. Довжина стовбура 10-12 мм, короткі гілки довжиною до 5-10 мм і товщиною близько 1 мм, утворюють щільну основу [7].

Проведенні дослідження із зміною до кількості модифікатора до 10% збільшує товщину кристалів до 3 - 5 мм, а довжину 10-15 мм. Тобто збільшення кількості добавки веде до формування більш щільної структури.

Утворення різних форм кристалів показує, що вид і кількість добавки змінює параметри процесу гідратації і відповідно структуру та властивості.

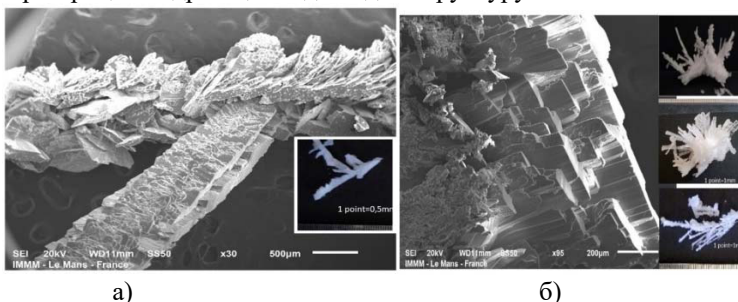


Рис. 4. Електронні мікрофотографії твердих розчинів модифікованих добавками:

а) – SiC-micro, б) – SiC-nano

Кристали, вирощені з добавкою **SiC-nano**, також мають стовпчасту форму, але ці кристали більш щільні і довші, діаметр 0,5-1мм, довжина - 15мм. Аналіз мікрофотографій, вказує, що кристал росте шар за шаром (рис.4б), які розташовані перпендикулярно осі росту. Вони мають форму плит, що щільно прилягають одна до одної. Порівнюючи з кристалами вирощеними в кристалоутворюючому середовищі з пластифікатором Sika Visco Grete і добавками SiC-micro структура є більш щільною і впорядкованою.

Процеси гідратації мінеральних в'язучих речовин в багатофазній і нестабільній системі досить складні і потребують проведення системного аналізу на всіх рівнях, крім того, визначення міжрівневих зв'язків. На основі аналізу особливостей структурної топології та утворення сполук при гідратації мінеральних в'язучих речовин з мікро- та нанодобавками відкриває можливості для поліпшення реологічних властивостей, оптимізації мікро- та макроструктури [16].

Висновки. Механізм процесів гідратації мінеральних в'язучих речовин є досить складним в зв'язку з багатокомпонентністю системи, нестабільністю і значною кількістю факторів впливу. У системі механізм гідратації та тверднення постійно змінюється стан твердою і рідкою фази, що впливає на топологію структури. В результаті формуються гідратні фази з різною кристалічною структурою (голки, волокна, призми, пластинки). Процес гідратації мінеральних в'язучих речовин, тобто переходу неньютоновської рідини в твердий стан, можна розділити на три основних періоди: зародження кристалів, формування скелета і його заповнення. Розгляд з цієї позиції дає можливість визначити в спрощеному вигляді механізм структуроутворення. А також встановити певний зв'язок між властивостями початкових матеріалів, умов процесу гідратації і структурою та властивостями затверділого матеріалу.

При вирощування кристалів в середовищі без пластифікатора вирішальним фактором є ступінь перенасичення розчину і час перебування системи в перенасиченому стані. Наявність пластифікатора в кристалоутворюючому середовищі, змінює ступінь перенасичення і часу знаходження структури в такому стані. На гранях кристала відбувається селективна адсорбція пластифікатора і в результаті змінюється енергія поверхні та швидкість процесів. На наш погляд енергія поверхні та перенасичення є ключовими факторами зародження та формування скелета. Наявність пустот значного об'єма і швидкість процесів формування кристалів створює умови виникнення внутрішніх напружень. Введення пластифікатора не тільки зменшує водо-тверде співвідношення (в/т), а також сповільнює кристалоформування. Це позитивно впливає на властивості затверділих матеріалів.

Додавання мікро та нано добавок до кристалоутворюючого розчину прискорює процеси гідратації. Підвищений вміст дрібних фракцій сприяє збільшенню питомої поверхні, енергії поверхні і, як наслідок, коефіцієнта поверхневої активності. Система знаходиться в перенасиченому стані за менший час, прискорюється розчинення та гідратація, і утворення кристалів гіпсу. Велика кількість кристалів, що мають дендритну форму, вказує на нерівноважні умови кристалізації.

Додавання мікро- та нанодобавок дозволяє змінювати поверхневу енергію, а додавання пластифікаторів змінює час перебування розчину в перенасиченому стані. Зміна цих факторів дозволяє впливати на морфологію кристалів. З введенням нанодобавок спостерігається більша впорядкованість у зростанні кристалів, що може бути пов'язано з перерозподілом поверхневої енергії, зі збільшенням кількості центрів кристалізації, більш рівномірним взаємним розташуванням частинок, що збільшує кількість контактів.

У системах зв'язування в процесі гідратації та затвердіння гіпсу стан та топологія структури постійно змінюються. Утворюються гідратні фази з різною кристалічною структурою (голки, волокна, призми, пластинки). Все це вносить певну нестабільність і розлад у формування структури.

Результати досліджень показують величезні можливості контролю за формуванням структури мінеральних в'язучих речовин сполучних шляхом регулювання кількості центрів кристалізації та зміни площі поверхні поділу фаз.

Виявлення залежностей між параметрами гідратації, структурою сполучного та функціональними властивостями відкриває нові можливості для отримання матеріалів з поліпшеними або новими властивостями, що відповідають вимогам сучасного будівництва.

1. Runova, R. F., Dvorkin L. J., Dvorkin O. L., Nosovskij YU. L. (2012). Binders. K.: Osnova. 448p.

2. Cao, W., Zhu, H. (2024). A Study on the Application Performance of High-Aspect-Ratio Nano-Ettringite in Photocurable Resin Composites. Materials, 17 (14), 3492. <https://doi.org/10.3390/ma17143492>

3. Derevianko V. The influence of nanoparticles on the processes of gypsum hydration/ Derevianko V., Tchymak A., Vaganov V.// Building materials. – M.: 2014, 7. C.22-24.
4. Victor Derevianko, Natalia Kondratieva and Hanna Hryshko (2018). Study of impact factors and the mechanism of gypsum binder hydration process in the presence of nanomodifiers. French-Ukrainian Journal of Chemistry. 6, No. 1: 92. <https://doi.org/10.17721/fujcV6I1P92-100>.
5. Tolmachov, S., Belichenko, O. (2017). Prospects of nanoparticles in concrete transport appointment. Budivelni materialy ta vyroby, 1-2, 38–41. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/smii_2017_1-2_16
6. Tuinukuafe, A., Noor, L., Ideker, J. H., Isgor, O. B. (2022). Factors Influencing the Electrical Properties of Ettringite Binders as Repair Materials. MATEC Web of Conferences, 364, 02005. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202236402005>
7. Sanytsky M., Kropyvnytska T., Fischer H., Kondratieva N. Performance of low carbon modified composite gypsum binders with increased water resistance. Chemistry & Chemical Technology. 2019. Vol. 13, № 4. P. 495–502.
8. Derevianko V. M., Kondratieva N. V., Hryshko H. M. (2023) Teoretychni ta praktychni pytannia ahrarnoi nauky: Kolektyvna monohrafiia. Pid zahalnoi red. A.S. Kobets [Theoretical and Practical Issues of Agricultural Science: Collective Monograph. Under the general editorship of. A.S. Kobets], Chapter 14: Nanomodified binders for ion shielding solutions, 276-292. - ISBN 978-966-981-748-8.
9. Plugin A.A. Increase of gypsum water resistance by mineral additives / A.A. Plugin, O.A. Plugin, H.-B. Fischer, G.N. Shabanova // 1 Weimarer Gipstagung, 30–31 März 2011, Weimar, Bundesrepublik Deutschland: Tagungsbericht. – Weimar: F.A. Finger–Institut für Baustoffkunde, Bauhaus–Universität Weimar, 2011. – N P21. – P.435–443
10. Kryvenko P.V., Pushkariova K.K., Baranovskiy V.B., Kochevyyh M.O., Hasan Ye.G., Konstantynivskiy B.Ya. and Raksha V.O. (2015). Materials Science in Construction : textbook. Ed. by P.V. Kryvenko. Kyiv : Lira-K Publ., 2015, 624 p.
11. Derevianko, V., Hryshko, H., Zaiats, Y., Drozd, A. (2025). Identifying the influence of nanomodifiers on the structure formation process regularities in the gypsum-alumina cement system. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1 (6 (133)), 42–52. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.323295> (Scopus).
12. Derevianko, V. M., Hryshko, H.M., Zaiats, Ye. I., Dubov, T. M. (2025). Theoretical and experimental justification of the principles of modifying compositions of CaO-Al₂O₃-SO₃-H₂O systems. Chemistry, Physics and Technology of Surface [Himia, Fizika ta Tehnologia Poverhni], Vol. 16, No 1, 51–62. <https://doi.org/10.15407/hftp16.01.051>.
13. Kondratieva N., Sanytsky M.; Soltysik R. Microstructure and properties of modified gypsum systems 3. Weimarer gipstagung, Weimar Bundesrepublik Deutschland tagungsbericht, 2017. p. 162-165. ISBN: 9783000554476; 3000554475.
14. Hryshko, H. (2025). Design of protective solutions based on a nanomodified gypsum alumina cement system and investigation of their properties. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2 (6 (134)). <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.324424>.
15. Roman Fediuk, Natalia Makarova, Diyar N. Qader, Andrey Kozin, Mugahed Amran, Victoria Petropavlovskaya, Tatiana Novichenkova, Mikhail Sulman, Kirill Petropavlovskii, Combined effect on properties and durability performance of nanomodified basalt fiber blended with bottom ash-based cement concrete: ANOVA evaluation, Journal of Materials Research and Technology, Volume 23, 2023, Pages 2642-2657, ISSN 2238-7854, <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.01.179>.
16. Nguyen, H., Kunther, W., Gijbels, K., Samyn, P., Carvelli, V., Illikainen, M., & Kinnunen, P. (2021). On the retardation mechanisms of citric acid in ettringite-based binders. Cement and Concrete Research, 140, Article 106315. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106315>
17. Weihua Cao and Hong Zhu A Study on the Application Performance of High-Aspect-Ratio Nano-Ettringite in Photocurable Resin Composites Materials 2024, 17(14), 3492; <https://doi.org/10.3390/ma17143492>